

Medição de Formas Livres Através da Integração de um Sensor Óptico Tipo "Folha de Luz" em um Braço de Medição

por

Eng. Luiz Augusto Rodrigues Nerosky

**Universidade Federal de Santa Catarina
Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial
Laboratório de Metrologia e Automação -
Labmetro**

Trabalho apresentado como parte dos requisitos para a obtenção do título de
Mestre em Metrologia na Universidade Federal de Santa Catarina.,
Florianópolis, Santa Catarina.

Florianópolis, 16 de março de 2001

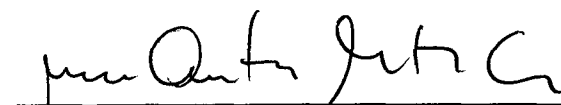
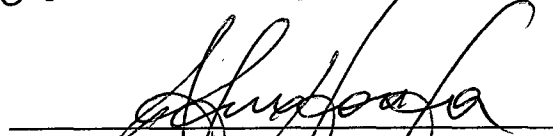
APROVAÇÃO

Nome: Eng. Luiz Augusto Rodrigues Nerosky
Titulação: Mestre em Metrologia
Título da Dissertação: Medição de Formas Livres Através da Integração de um Sensor Óptico Tipo "Folha de Luz" em um Braço de Medição

Banca Examinadora:



Prof. Edison da Rosa, Dr. Eng.
Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC


Prof. Marco Antônio Martins Cavaco, Ph.D.
Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC
Prof. André Roberto de Sousa, Dr. Eng.
Laboratório de Metrologia - ETFSC

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.
Orientador
Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC

Resumo

Este trabalho prevê a implementação e a avaliação metrológica de um sistema de medição capaz de medir superfícies livres sem contato e em tempo reduzido. Formado a partir de integração de um sensor óptico a laser do tipo “Folha de Luz” em um Braço de Medição (Máquina de Medir por Coordenadas Portátil), esse sistema apresenta vantagens e desvantagens frente a outras técnicas citadas no escopo do trabalho e que são também empregadas na medição deste tipo de superfície.

Para tanto, um estudo resumido sobre o princípio de funcionamento do sensor óptico e do braço de medição é inicialmente apresentado, discutindo-se ainda as principais fontes de incerteza e formas de calibração de cada sistema em separado.

Em seguida, apresenta-se, com detalhes, o acoplamento mecânico de ambos os sistemas e a metodologia especialmente desenvolvida capaz de combinar as informações geradas pelo sensor óptico e pelo braço de medição: a medição de uma esfera. Informações sobre o modelo matemático e sua implementação computacional são então discutidas.

Com relação à avaliação metrológica, geometrias conhecidas (plano e esferas) são medidas e a incerteza do sistema integrado estimada a partir da dispersão dos dados em relação a um plano e esferas médias ajustadas pelo Método dos Mínimos Quadrados. A influência das incertezas do sensor óptico e da metodologia de combinação dos dados sensor / braço são analisadas.

Alguns exemplos de aplicação do sistema integrado em superfícies 3D são também apresentados.

Abstract

In many practical situations, there are interest and need to establish the geometry of free-form surfaces as, for example, in automotive, aerospace and naval industries. Nowadays, some measurement systems are used for the characterization of surfaces. A possible solution that could be applied to such measurement are Coordinate Measuring Machines (CMM) which provide low uncertainties. The main disadvantages of this technique are the great number of points necessary to characterize the surface – regarding the cost of the measurement process - and its lack of portability. Another possibility of free-form surfaces characterization is the application of articulate mechanical arms as they can be portable, facilitating the work. However, they present larger uncertainties when compared to conventional CMM. In some cases, depending of the uncertainty desired, optical sensors conjugated with portable coordinate measuring machines are a possible solution to these problems. Here, the necessary time to do a complete measurement (including the best fitting of surface) is very reduced once the principle of operation of some sensors is not based on the determination of individual points but in a group of them at the same time, reducing the cost when compared to other systems. Therefore, this work seeks to develop a measuring system capable of measuring free-form surfaces through the combination of a light sheet optical sensor and a mechanical arm, including its metrological analysis. The compatibility between the two systems is made by a dedicated computer program.

**Dedico esta dissertação à minha esposa Vanessa
que, com muito amor, carinho e
compreensão, sempre me apoiou na
concretização desse sonho.**

Agradecimentos

Gostaria inicialmente de agradecer a Deus, pela vida, pela oportunidade desse estudo, pelas amizades formadas durante esses anos e pelo amor que constantemente tenho recebido de todos que me rodeiam.

Agradeço ainda:

- Aos meus pais e irmãos, pela educação, amor e cuidados dispensados em todos os momentos de minha vida;
- À minha esposa, pela paciência e dedicação;
- Às famílias Matos e Gubert, pelos cuidados e incentivos;
- Ao Prof. Armando, pela orientação e apoio dados em diversos momentos da minha formação como mestre e, principalmente, como profissional;
- À Rosana, pela constante disponibilidade;
- À Universidade Federal de Santa Catarina;
- À Fundação CERTI e LABMETRO;
- À COPEL, pelos equipamentos disponibilizados e pela oportunidade de contribuir com o projeto ROBOTURB;
- À CAPES, pelo apoio financeiro durante o primeiro ano de curso;
- À GERASUL, pelo apoio irrestrito à continuidade dos meus estudos;
- Aos amigos Alex, Joel e Felipe, que contribuíram de forma decisiva para o sucesso do trabalho;
- A todos os amigos do LABMETRO, pela amizade e companheirismo.

Sumário

Aprovação	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Sumário	vi
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
Siglas	xv
Capítulo 1	
Introdução	1
1.1 Estrutura do Trabalho.....	2
Capítulo 2	
Medição de Superfícies Livres	4
2.1 Caracterização de Superfícies Livres	4
2.2 Técnicas / Sistemas de Medição de Superfícies Livres	6
2.2.1 Máquinas de Medir por Coordenadas.....	6
2.2.2 Técnicas Ópticas de Medição de Forma.....	7
2.3 Exemplos de Medição de Superfícies Livres	13
Capítulo 3	
Sensor Óptico Tipo “Folha de Luz”	14
3.1 Princípio de Funcionamento	14
3.2 Análise da Imagem do Sensor Óptico Tipo “Folha de Luz”	17
3.3 Especificação Técnica de um Sensor Óptico Tipo “Folha de Luz”	19

3.4	Construção de um Sensor Óptico Tipo “Folha de Luz” em Laboratório	22
3.5	Calibração do Sensor Óptico Tipo “Folha de Luz” construído em Laboratório	24
3.5.1	Principais Fontes de Incerteza de um Sensor Óptico	24
3.5.2	Calibração do Sensor Óptico Tipo “Folha de Luz”	27
3.5.3	Estimativa da Incerteza do Sensor Óptico	31
Capítulo 4		
	Braço de Medição (Máquina de Medir por Coordenadas Portátil)	33
4.1	Princípio de Funcionamento de um Braço de Medição	33
4.2	Estado da Arte	37
4.3	Calibração de um Braço de Medição	38
4.4	Braço de Medição Utilizado	42
Capítulo 5		
	Integração do Sensor Óptico Tipo “Folha de Luz” ao Braço de Medição	43
5.1	Aspectos Funcionais do Sistema de Medição Integrado	43
5.2	Integração Mecânica do Sensor Óptico Tipo “Folha de Luz” ao Braço Mecânico de Medição	45
5.3	Integração Numérica do Sensor Óptico Tipo “Folha de Luz” ao Braço Mecânico de Medição	47
5.3.1	Modelo Matemático para Determinação dos Parâmetros de Posição e Orientação do Sensor Óptico em Relação ao Apalpador Mecânico	48
5.3.2	Metodologia para Determinação dos Parâmetros de Posição e Orientação do Sensor Óptico em Relação ao Apalpador Mecânico	51
5.3.3	Resolução da Função Não-Linear	53
5.4	Algoritmo para Medição de Forma 3-D Através do Sistema Integrado	55
5.4.1	Teste de Validação do Algoritmo de Cálculo dos Parâmetros de Posição e Orientação do Sensor Óptico em Relação ao Braço de Medição	56
5.4.2	Estimativa da Incerteza na Calibração dos Parâmetros de Posição e Orientação do Sensor Óptico	58
Capítulo 6		
	Análise Metrológica do Sistema Integrado	60
6.1	Fontes de Incerteza	60
6.2	Estimativa da Incerteza do Sistema de Medição Integrado	62
6.2.1	Medições de Superfícies Geométricas Regulares	62
6.2.2	Análise dos Resultados da Medição de Superfícies Regulares	69
6.2.3	Resultados Finais – Incertezas Padrão e Expandida	74
6.3	Medição de Superfícies Livres	75
6.4	Medição Dimensional – Distância entre Centros de Esferas	75

Capítulo 7	
Conclusões	77
Referências Bibliográficas	83

Lista de Figuras

Figura 2.1 Exemplo de varredura contínua com MMC (apalpador mecânico).....	6
Figura 2.2 Fotogrametria aplicada na determinação da posição de uma aeronave durante teste em túnel de vento. Detalhes da distribuição de pontos sobre o corpo da aeronave	8
Figura 2.3 Princípio de Medição de Forma por Autofoco.....	9
Figura 2.4 Esquema do Aparato Experimental utilizado na aplicação da Técnica de Shadow Moiré.....	9
Figura 2.5 Princípio da Técnica de Triangulação.....	11
Figura 2.6 Técnica de Triangulação - Semelhança de Triângulos.....	11
Figura 3.1 Esquema de Funcionamento do Sensor Óptico tipo “Folha de Luz”.	15
Figura 3.2 Criação do plano de luz através da utilização de fibras ópticas.	16
Figura 3.3 Criação do plano de luz através do sistema de varredura.....	17
Figura 3.4 Representação de imagens obtidas pelo sensor óptico tipo “folha de luz” (com CCD) na medição de duas superfícies distintas: (a) plano e (b) peça com chanfro em “V”.....	18
Figura 3.5 Distribuição de intensidade luminosa sobre a j-ésima linha do CCD.....	18
Figura 3.6 Visualização de alguns parâmetros característicos de um sensor óptico tipo “folha de luz”	19
Figura 3.7 Fotografia de uma Turbina Hidráulica de Grande Porte.....	21

Figura 3.8 Esquema da peça mecânica projetada para fixação dos equipamentos usados no sensor óptico tipo “folha de luz” construído em laboratório.	23
Figura 3.9 Representação Bidimensional da Triangulação Óptica – Destaque para a Curva de Intensidade Luminosa da Imagem como sendo do tipo Gaussiana.	24
Figura 3.10 Influência das características ópticas e geométricas do mensurando sobre a medição de pontos de sua superfície com um sensor óptico baseado no princípio da triangulação.	25
Figura 3.11 Influência da descontinuidade da reflectância da superfície sobre os erros de medição, considerando diversos ângulos de triangulação.	25
Figura 3.12 Medição de uma esfera metálica em duas direções através de um sensor óptico por triangulação	26
Figura 3.13 Figura esquemática do aparato experimental utilizado na calibração do sensor óptico tipo “Folha de Luz”.	27
Figura 3.14 Gráfico Contendo os Binômios ($C_{j,j}$) para Diversas Posições da Mesa Micrométrica	29
Figura 3.15 Curva de Calibração do Sensor Óptico – Relação entre Deslocamento Lateral da Imagem (em pixels) e a Distância Real do Objeto (Profundidade – em mm)	30
Figura 3.16 Curva de Calibração do Sensor Óptico – Determinação do fator de correção multiplicativo da componente “j” do binômio ($C_{j,j}$) em função da profundidade do objeto (mm).	31
Figura 4.1 Máquina de medir por coordenada de eixos cartesianos.	34
Figura 4.2 Braço de Medição – Configuração Antropóide e seu volume de trabalho.	35
Figura 4.3 Braço de Medição – Configuração SCARA e seu volume de trabalho.	36
Figura 4.4 Determinação da posição e orientação do sistema de coordenadas local do apalpador em relação ao sistema de coordenadas global do braço.	37

Figura 4.5	Calibração de Braços de Medição através de um dispositivo especial formado por uma barra e um braço telescópico vertical. ...	39
Figura 4.6	Calibração de Braços de Medição através de "ball bar" adaptado para sistemas de medição por coordenadas com eixos rotativos....	40
Figura 4.7	Calibração de Braços de Medição com auxílio da Interferometria.	41
Figura 4.8	Calibração de Braços de Medição de configuração SCARA.	41
Figura 5.1	Fotografia da base do apalpador mecânico do braço de medição. Detalhe para o furo de fixação do dispositivo.	46
Figura 5.2	Fotografia do acoplamento mecânico do sensor óptico tipo "folha de luz" ao braço de medição FARO.....	46
Figura 5.3	Representação Esquemática dos Sistemas de Coordenadas Envolvidos no Sistema Integrado Braço / Sensor Óptico.....	47
Figura 5.4	Fluxograma da metodologia empregada na integração numérica do sensor óptico ao braço de medição.....	53
Figura 5.5	Tela de Apresentação do Programa de Integração Numérica e Medição de Forma 3-D.....	55
Figura 5.6	Determinação matemática das coordenadas medidas pelo sensor óptico durante medição virtual de uma esfera matematicamente perfeita.	57
Figura 6.1	Diagrama do Processo de Medição com o Sistema Integrado Braço / Sensor.....	61
Figura 6.2	Diagrama do Tipo "Espinha de Peixe" contendo as Fontes de Incerteza do Sistema de Medição Integrado.....	62
Figura 6.3	Fotografia das Esferas de 20 mm e 25 mm presas sobre uma barra metálica.	65
Figura 6.4	Modelo utilizado para estimar a influência das incertezas dos parâmetros de translação nos resultados da medição com o sistema integrado.	71
Figura 6.5	Modelo utilizado para estimar a influência da incerteza do parâmetro de rotação θ_x nos resultados da medição com o sistema integrado.	73

Figura 6.6 Fotografia de uma peça de massa química e gráfico 3-D contendo coordenadas de sua superfície medidas com o sistema integrado.....	75
Figura 6.7 Fotografia de uma manequim e gráfico 3-D contendo coordenadas de sua superfície medidas com o sistema integrado.....	75

Listá de Tabelas

Tabela 3.1 Especificação Técnica do Sensor Óptico Desenvolvido em Laboratório.....	23
Tabela 4.1 Comparação Qualitativa entre braço de medição antropóide, robôs de medição e MMC convencionais	35
Tabela 4.2 Braços de medição disponíveis comercialmente	38
Tabela 5.1 Resultados das calibrações de posição e orientação do SCSO em relação ao SCLA através de medição virtual de uma esfera matematicamente perfeita e de raio igual a 25 mm com sensor óptico ideal (sem incertezas).....	58
Tabela 5.2 Resultados das calibrações de posição e orientação do SCSO em relação ao SCLA através de medição virtual de uma esfera matematicamente perfeita e de raio igual a 25 mm com sensor óptico não ideal (com incertezas).	59
Tabela 6.1 Resultados das medições do plano na posição espacial “A”	63
Tabela 6.2 Resultados das medições do plano na posição espacial “B”	64
Tabela 6.3 Resultados das medições do plano na posição espacial “C”.....	64
Tabela 6.4 Resultados das medições da esfera de 20 mm na posição espacial “D”	66
Tabela 6.5 Resultados das medições da esfera de 25 mm na posição espacial “D”	66
Tabela 6.6 Resultados das medições da esfera de 20 mm na posição espacial “E”	67
Tabela 6.7 Resultados das medições da esfera de 25 mm na posição espacial “E”	68

Tabela 6.8 Resultados das medições da esfera de 20 mm nas posições espaciais “F”, “G” e “H”.....	68
Tabela 6.9 Resultados das medições da esfera de 25 mm nas posições espaciais “F”, “G” e “H”.....	69
Tabela 6.10 Média dos raios ajustados para as esferas em cada posição espacial medida.....	70
Tabela 6.11 Resultados das medições virtuais da esfera de 25 mm em três posições espaciais - “I”, “J” e “K” – considerando a incerteza do sensor óptico.....	70
Tabela 6.12 Comparação dos Resultados da Medição do Plano e Esferas para a MMCc, Braço de Medição e Sistema Integrado.....	74
Tabela 6.13 Comparação dos resultados da medição de distâncias entre centro de esferas com o Braço de Medição e com o Sistema Integrado.....	76

Siglas

CAD – Sigla em inglês: *Computer Aided Design*

MMC – Máquina de Medir por Coordenadas

PADCT – Programa de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CCD – Sigla em inglês: *Coupled Charge Device*

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

Fundação CERTI – Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras

LABMETRO – Laboratório de Metrologia e Automatização

Pixel – Contração da sigla em inglês: *Picture Cell*

CNC – Comando Numérico Computadorizada

SCARA – Sigla em inglês: *Selective Compliance Assembly Robot Arm*

COPEL – Companhia Paranaense de Energia

SCGB - Sistema de Coordenadas Global do Braço Mecânico de Medição

SCLA - Sistema de Coordenadas Local do Apalpador Mecânico

SCSO - Sistema de Coordenadas do Sensor Óptico

Capítulo 1

Introdução

Superfícies livres são de grande importância no contexto de design e manufatura. Diversos objetos são projetados, seja por razões funcionais ou estéticas, utilizando tais superfícies.

É natural, portanto, que em muitas situações práticas, haja o interesse e a necessidade de se conhecer com determinada exatidão a forma tridimensional de certos objetos. Para tanto, técnicas especiais de medição têm sido desenvolvidas visando:

- garantir que muitos produtos possuam uma geometria fiel ao seu projeto através da detecção, rejeição ou retrabalho daqueles julgados de baixa qualidade;
- obter uma linha de fabricação de ponta através da verificação da qualidade dos produtos gerados em cada fase do processo de produção, identificando as falhas existentes na linha (produção mais rápida e eficiente);
- gerar modelos em CAD através da determinação de coordenadas espaciais de objetos já existentes (Engenharia Reversa). Dentre as principais aplicações de Engenharia Reversa estão a geração de módulos de produção a partir de

protótipos físicos e a construção de modelos de referência para garantia da qualidade dos produtos.

Em todas as situações acima, prevalece a aplicação da tecnologia de medição por coordenadas, em especial, da Máquina de Medir por Coordenadas com eixos cartesianos (MMC) uma vez que esta apresenta grande flexibilidade e incerteza de medição bem reduzida.

Porém, em se tratando de medição de superfícies livres, as MMC podem apresentar algumas desvantagens. As principais são:

1. Baixa velocidade de medição;
2. Falta de portabilidade.

Buscando contornar essas desvantagens sem comprometer demasiadamente a incerteza de medição propõe-se, no presente trabalho, a implementação e a avaliação metrológica de um sistema de medição através da integração de um sensor óptico tipo “Folha de Luz” em um Braço de Medição (Máquina de Medir por Coordenadas Portátil).

Além disso, busca-se o desenvolvimento de uma tecnologia cuja aplicação será estendida imediatamente ao projeto ROBOTURB (Sistema Automatizado de Recuperação de Turbinas Hidráulicas de Grande Porte – PADCT III) onde um sensor óptico desse mesmo tipo deverá ser integrado ao manipulador de um robô articulado, sendo capaz de determinar a forma de pás de turbinas hidráulicas.

1.1 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado em 7 capítulos sendo o primeiro, a própria introdução.

No segundo capítulo, aborda-se a questão da caracterização de superfícies livres, fazendo ainda uma descrição sucinta das técnicas ópticas de medição de forma. Destaque para a técnica de triangulação utilizada pelo sensor “Folha de Luz”.

Já no capítulo 3, faz-se uma introdução ao princípio de

funcionamento, calibração e principais fontes de incerteza do sensor tipo “Folha de Luz”.

De forma semelhante, o capítulo 4 traz uma descrição do princípio de funcionamento de um braço de medição, incluindo ainda uma discussão sobre as formas de calibração e fontes de incerteza.

O quinto capítulo aborda a integração do sensor óptico ao braço de medição. São apresentados os detalhes sobre a metodologia utilizada bem como a dedução do modelo matemático.

A análise metrológica do sistema integrado pode ser encontrada no sexto capítulo, bem como resultados de ensaios utilizando peças geométricas conhecidas, os quais serviram de base para a estimativa da incerteza do sistema. Apresentam-se ainda algumas medições de formas livres.

Conclusões e recomendações a respeito do sistema integrado encontram-se no capítulo 7.

Capítulo 2

Medição de Superfícies Livres

2.1 Caracterização de Superfícies Livres

Superfície livre pode ser definida como sendo toda e qualquer superfície cuja geometria não pode ser representada por equações matemáticas definidas, sendo normalmente de difícil descrição analítica [1].

Este tipo de superfície tem sido cada vez mais empregada na indústria devido à sua funcionalidade, *design* ou até mesmo facilidade de produção. Como exemplo, tem-se o gancho de telefone, mouse de computador, raquete de tênis, próteses humanas, cadeiras, maçanetas, etc.

Duas metodologias são normalmente empregadas em análise geométrica de superfícies livres: comparação direta e indireta [2].

O princípio básico da comparação direta é verificar o desvio entre a superfície a ser analisada e uma superfície tida como padrão através da medição das distâncias (folgas) existentes entre as duas quando sobrepostas. As principais desvantagens de se usar superfícies padrão em medições geométricas são a incerteza de medição, que se torna fortemente dependente da habilidade do operador (técnico), e os custos de fabricação e manutenção dos próprios padrões.

Já a comparação indireta baseia-se na tecnologia de medição por coordenadas, sendo esta metodologia mais empregada que a anterior. Nesse

caso, as coordenadas de diversos pontos da superfície do mensurando são determinadas (dados discretos) e os erros geométricos são definidos como sendo as diferenças entre os valores medidos e valores de referência. Como a posição e a magnitude dos erros são fornecidos explicitamente, sua incerteza de medição é geralmente menor que no caso da comparação direta.

Além disso, uma superfície contínua pode ser obtida a partir dos pontos medidos por comparação indireta. Para tanto, técnicas de minimização dos erros residuais (diferença entre a superfície medida e superfície ajustada) são normalmente empregadas. Diferentes métodos de minimização podem ser usados, sendo a L_2 e a L_∞ os mais comuns. No método L_2 , também conhecido como método dos Mínimos Quadrados, a soma quadrática dos erros residuais é minimizada. Já no método L_∞ tem-se que os erros residuais máximo e mínimo são iguais, em módulo, e mínimos. Dependendo do método de minimização utilizado, os parâmetros da superfície ajustada variam. Além disso, alguns métodos de minimização são mais sensíveis à irregularidades da superfície que outros.

Outra alternativa é aplicação de técnicas geométricas para modelagem de superfície por parametrização. Neste caso, informações importantes sobre a superfície podem ser obtidas a partir dos modelos construídos, tais como vetor tangente, vetor normal e curvatura [2]. Alguns exemplos de técnicas geométricas são Bezier, Spline e β -Spline. Uma descrição detalhada sobre aplicação e limitação de cada técnica pode ser obtida em Qiulin *et al* [4].

Ressalta-se, entretanto, que, independente da metodologia utilizada, informações sobre a orientação, posição e forma são essenciais para uma única caracterização de uma superfície livre, exigindo uma análise bastante detalhada.

O mesmo não ocorre em geometrias mais simples como a esfera, por exemplo, onde para se ajustar uma superfície esférica não é necessária uma avaliação de parâmetros de orientação. Uma esfera é simétrica em relação à qualquer eixo que passe através de seu centro e, portanto, pode ser totalmente descrita pela sua posição e forma (coordenadas do centro e raio)[3].

A medição é, portanto, apenas uma etapa no processo de caracterização de uma superfície, porém necessária e extremamente importante.

2.2 Técnicas / Sistemas de Medição de Superfícies Livres

2.2.1 Máquinas de Medir por Coordenadas

A tecnologia de medição por coordenadas é amplamente empregada em medições de superfícies livres (comparação indireta). Em destaque, tem-se a Máquina de Medir por Coordenadas com eixos cartesianos (MMC), uma vez que esse sistema de medição apresenta flexibilidade, incerteza de medição reduzida [5] e possibilidade de comunicação direta com sistemas CAD, permitindo que a superfície em questão seja varrida pelo apalpador e seus dados analisados e comparados com valores nominais (superfície nominal especificada em projeto) [6].

Dois processos de varredura podem ser usados em medições de superfícies livres através de MMC: varredura contínua ou pontual. No primeiro caso, o apalpador é deslocado sobre a superfície mantendo contato mecânico permanente com o mensurando sendo as coordenadas medidas enviadas periodicamente para o computador da máquina. Um exemplo de varredura contínua é apresentada na Figura 2.1.

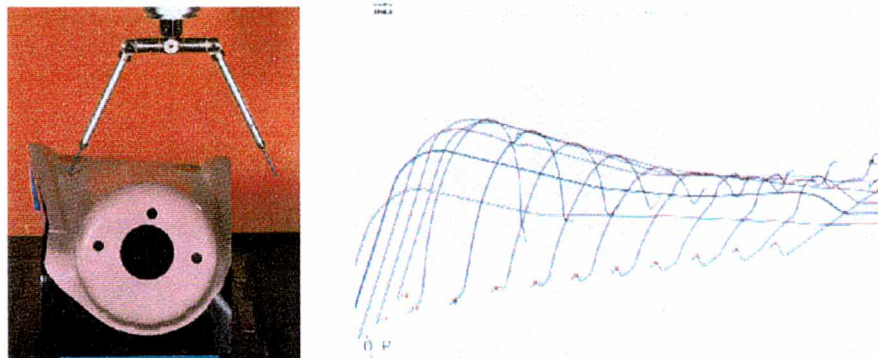


Figura 2.1 Exemplo de varredura contínua com MMC (apalpador mecânico) [7]

Já na varredura pontual, o apalpador é posicionado sobre a superfície e as coordenadas de um ponto são determinadas. Dados de um novo ponto da superfície somente são determinados após um reposicionamento do apalpador. Para geometrias definidas (planos, cilindros, esferas, etc), a definição dos pontos de medição são normalizados, como consta, por exemplo, na BS 7172 [8]. Nesta norma, tem-se a definição de como o problema de discretização de

uma geometria definida deve ser atacado de modo a permitir um melhor resultado de medição.

Em relação às superfícies livres, entretanto, a escolha do número e da posição de pontos a serem medidos é mais difícil, impossibilitando muitas vezes uma pré-programação da MMC¹. Quanto maior a complexidade da superfície, maior a densidade de pontos a serem determinados [9].

2.2.2 Técnicas Ópticas de Medição de Forma

A utilização de técnicas ópticas de medição de forma é cada vez mais freqüente pois permite um aumento na velocidade de medição se comparada à velocidade do sistema de apalpação mecânica usual em MMC [10]. Além disso, a medição é realizada sem contato com o mensurando.

Pode-se dividir as técnicas ópticas em dois grupos principais: as técnicas passivas e as ativas [30].

As técnicas passivas são aquelas que não dependem de nenhuma fonte ativa de energia (fonte de laser, projetor, etc) para realizar a medição. Como exemplo de técnica passiva tem-se a fotogrametria.

Ao contrário, nas técnicas ativas fontes ativas de energia estão presentes. Neste caso, a energia é emitida em direção ao mensurando e então captada e processada pelo sensor. Normalmente, a energia mais utilizada é a luminosa. Exemplos de técnicas ativas são autofoco, moiré e triangulação.

A seguir, tem-se uma breve descrição de técnicas ativas e passivas citadas anteriormente, dando-se destaque àquela utilizada pelo sensor óptico “Folha de Luz”.

Técnicas Passivas

Fotogrametria

Esta técnica é baseada no mesmo princípio do olho humano, onde informações 3-D são obtidas através da visualização de um objeto a partir de

¹ Caso de MMC equipadas com CNC

duas perspectivas diferentes (paralaxe) e da combinação das imagens obtidas [11][42]. Contudo, a correspondência de pontos homólogos (pontos nas imagens referentes ao mesmo ponto físico da superfície) é um problema particular desta técnica [12][13].

Um exemplo da aplicação da fotogrametria pode ser vista na figura abaixo onde um modelo de aeronave é observado de dois ângulos diferentes e as duas imagens são analisadas, permitindo determinar a posição 3-D do objeto em questão.

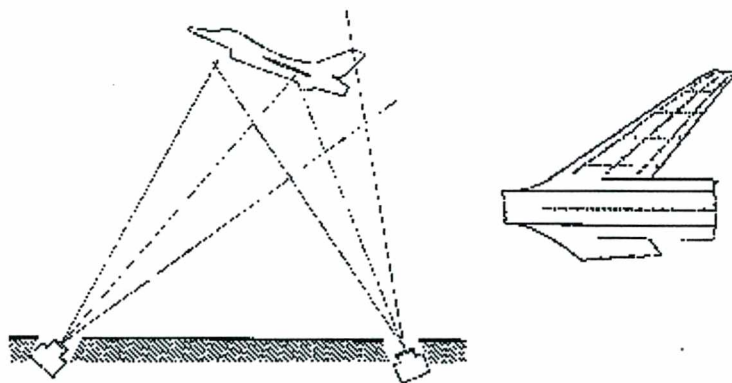


Figura 2.2 Fotogrametria aplicada na determinação da posição de uma aeronave durante teste em túnel de vento. Detalhes da distribuição de pontos sobre o corpo da aeronave [12].

Técnicas Ativas

Autofoco

Nesta técnica, faz-se a projeção de um feixe de laser sobre a superfície a ser medida tal como mostra a figura 2.3. Parte da luz refletida pela superfície é retomada pela própria objetiva, sendo então concentrada sobre um fotodetector de intensidade. Aplicando deslocamentos conhecidos sobre a objetiva através de um sistema posicionador, tem-se uma variação na intensidade medida pelo fotodetector. No ponto de máxima intensidade, tem-se a objetiva focalizada. Portanto, é possível medir a distância entre o sensor e a superfície a partir dos deslocamentos sofridos pela objetiva [14][15]. Quando este processo é repetido para vários pontos, a forma da superfície pode ser caracterizada.

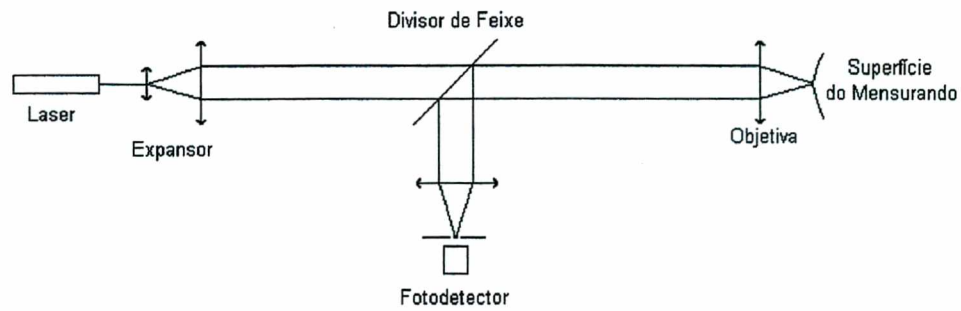


Figura 2.3 Princípio de Medição de Forma por Autofoco.

Moiré

As técnicas de moiré são baseadas na superposição de linhas de grade, que podem ser produzidas em transparência ou filme fotográfico ou podem ser geradas através de interferência de duas ondas de luz projetadas sobre a superfície [16].

O método mais simples é chamado de "shadow moiré". Este método tem sido extremamente usado nas últimas décadas em análises de perfis de variados componentes, sendo apresentado esquematicamente na figura 2.4 [17].

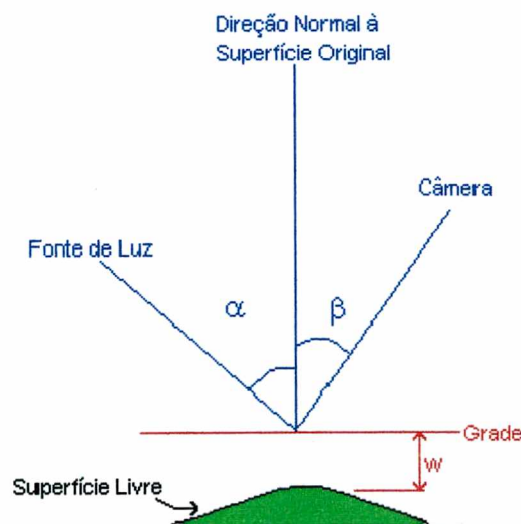


Figura 2.4 Esquema do Aparato Experimental utilizado na aplicação da Técnica de Shadow Moiré.

Fazendo-se incidir sobre a grade energia luminosa, projetam-se sobre a superfície a ser medida sombras das linhas da grade. Contudo, devido às variações de forma existentes na superfície em estudo, as franjas originadas podem sofrer alterações na sua distribuição ao longo da superfície. Com base numa relação matemática conhecida (Equação 2.1), pode-se calcular qual a distância da superfície do objeto em relação à uma referência qualquer, geralmente a própria grade:

$$w(x, y) = \frac{N \cdot p}{\tan \alpha + \tan \beta} \quad (2.1)$$

Onde:

$w(x, y)$: distância ou cota de um ponto da superfície do mensurando em relação à referência (superfície de referência da grade) [mm];

N : ordem da franja de moiré associada ao ponto medido [adimensional];

p : distância entre as linhas da grade [mm];

α : ângulo de incidência da luz sobre a grade [°];

β : ângulo de observação da câmara [°].

Deve-se observar que a variável “ p ” é uma característica da grade que está sendo utilizada. Portanto, variando-se a grade, pode-se variar o valor de “ p ”. Além disso, as coordenadas “ x ” e “ y ” são dadas em relação a um sistema de eixos criados pelo próprio usuário.

Devido à simplicidade dessa técnica, existe a possibilidade de se automatizar o processo de medição por “shadow moiré” obtendo-se boas vantagens.

Triangulação

A triangulação óptica é uma das técnicas mais comuns aplicadas em medições 3-D [18]. Embora essa técnica tenha sido desenvolvida há algum tempo, sendo de domínio da comunidade científica, sua aplicação tem sido cada vez mais ampliada devido ao aumento na velocidade de medição e

exatidão nos resultados, possíveis em virtude do desenvolvimento de seus componentes (*hardware*) [19].

A figura 2.5 mostra esquematicamente o princípio da técnica de triangulação [21][46][48].

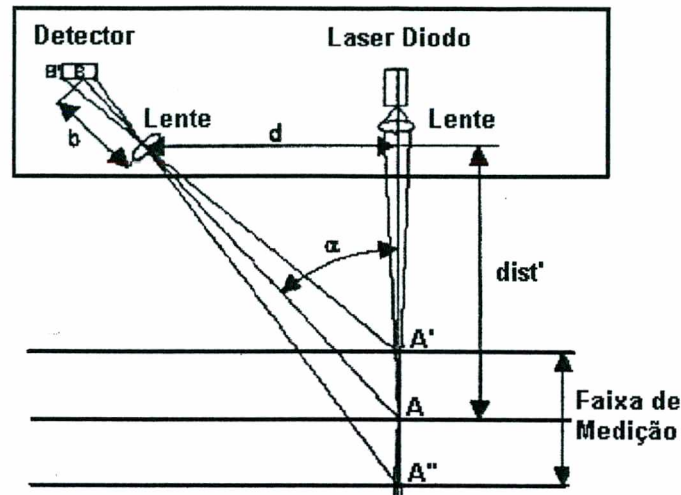


Figura 2.5 Princípio da Técnica de Triangulação.

O feixe de laser diodo é focado no ponto A sobre a superfície do objeto. O ângulo de incidência é normal. O ponto sobre a superfície é observado a partir de um ângulo α e, com o auxílio de uma lente, forma-se sobre a superfície de um detector a imagem do ponto, representada na figura pelo ponto B [45].

A mudança da distância do objeto ($dist'$) resulta em um deslocamento do ponto projetado sobre o CCD, como mostrado na figura 2.6.

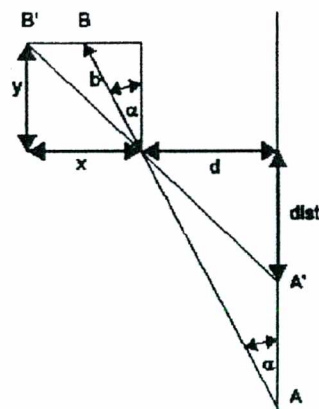


Figura 2.6 Técnica de Triangulação - Semelhança de Triângulos.

Por essa figura, pode-se estabelecer as seguintes igualdades:

$$x = BB' + b \sin \alpha \quad (2.2)$$

$$y = b \cos \alpha \quad (2.3)$$

Através da semelhança de triângulos:

$$\frac{d}{dist'} = \frac{x}{y} \quad (2.4)$$

Substituindo os valores de x e y , tem-se uma relação geométrica não linear dada por:

$$dist' = \frac{d \cdot b \cos \alpha}{b \sin \alpha + BB'} \quad (2.5)$$

Onde:

d : distância entre a lente de projeção do laser e a lente de visualização da imagem [mm];

b : distância entre a lente de visualização e o elemento fotosensível do CCD [mm];

BB' : deslocamento do ponto visualizado no elemento fotosensível do CCD [mm];

α : ângulo de triangulação [°];

$dist'$: distância de um ponto pertencente à superfície do mensurando em relação à fonte luminosa [mm].

Variações construtivas podem ser observadas no tocante à estrutura de iluminação (tipicamente pontual, em linha – caso do sensor “Folha de Luz”, multi-pontual ou multi-linha), ao sistema de captação da imagem (CCD ou *array* linear) e ao método de varredura (movimentação do objeto em relação ao sensor ou movimentação do sensor em relação ao objeto) [19].

2.3 Exemplos de Medição de Superfícies Livres

Alguns exemplos práticos observados em indústrias onde a medição e/ou caracterização de superfícies livres são realizadas são:

- indústrias automobilísticas [47][48]:
 - medição do perfil aerodinâmico dos automóveis com o objetivo de otimizar a razão consumo / desempenho;
 - medição de peças mecânicas complexas (engrenagens), permitindo um melhor acoplamento entre as partes de transmissão;
 - medição do chassis, identificando se há conformidade da geometria medida com a especificada em projeto;
- indústria aeronáutica:
 - medição do perfil aerodinâmico das aeronaves, garantindo que o arraste aerodinâmico permaneça nas condições especificadas em projeto;
 - medição do perfil das pás das turbinas aeronáuticas de modo a manter a eficiência térmica desejada;
- indústria naval:
 - medição do perfil hidrodinâmico do casco do navio;
- indústrias de geração de energia elétrica:
 - medição do perfil hidrodinâmico de pás de turbinas hidráulicas buscando identificar mudanças na forma no decorrer de sua utilização;
- indústrias de software:
 - digitalização da geometria de manequins para animação de jogos eletrônicos;
- indústrias biomecânicas:
 - digitalização e medição de partes humanas para produção de próteses.

Capítulo 3

Sensor Óptico Tipo “Folha de Luz”

3.1 Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento do sensor óptico tipo “Folha de Luz” consiste na projeção de um plano de luz (laser) na superfície a ser medida. A interseção deste plano com a superfície define uma linha que é então capturada por um sistema de visualização (normalmente CCD) posicionado, conforme a técnica de triangulação, a uma distância e inclinação conhecidas em relação ao plano de luz.

Analisando a imagem obtida, é possível determinar as coordenadas de pontos pertencentes ao mensurando em um sistema de coordenadas conhecido. Normalmente, o sistema de coordenadas é disposto no próprio plano de luz. Contudo, outras variações são possíveis. Um desenho esquemático é apresentado na Figura 3.1.

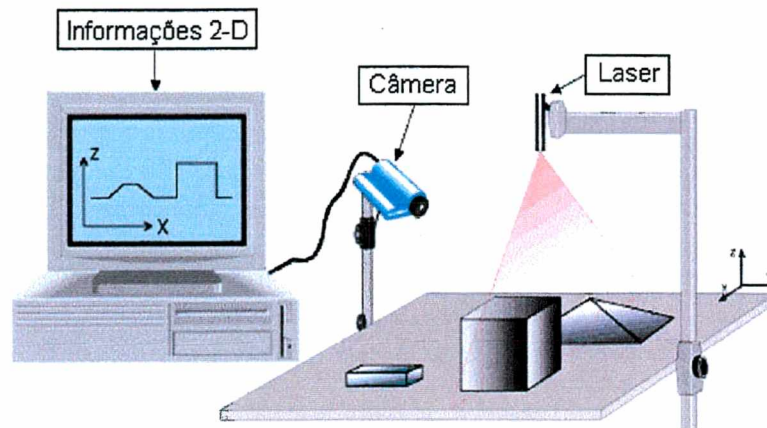


Figura 3.1 Esquema de Funcionamento do Sensor Óptico tipo “Folha de Luz” [36][49][61].

Nota-se que este tipo de sensor fornece informações bidimensionais sobre o mensurando. Na Figura 3.1, por exemplo, as coordenadas capazes de serem medidas pelo sensor “Folha de Luz” são “ x ” e “ z ”. Informações sobre a coordenada “ y ” (direção perpendicular ao plano de projeção) não são obtidas diretamente pela utilização do sensor. Portanto, caso se deseje uma representação tridimensional do mensurando, deve-se fazer uma movimentação relativa entre o sensor e o objeto de interesse determinando a coordenada “ y ” através de, por exemplo, um sistema de medição de deslocamento.

Algumas técnicas são empregadas para transformar o feixe do laser em um plano de luz. Uma delas é incidir o feixe luminoso sobre uma lente cilíndrica. Outra possibilidade, é a utilização de fibras ópticas dispostas paralelamente de tal forma que cada feixe da fibra incida sobre uma lente convergente como mostrado na Figura 3.2.

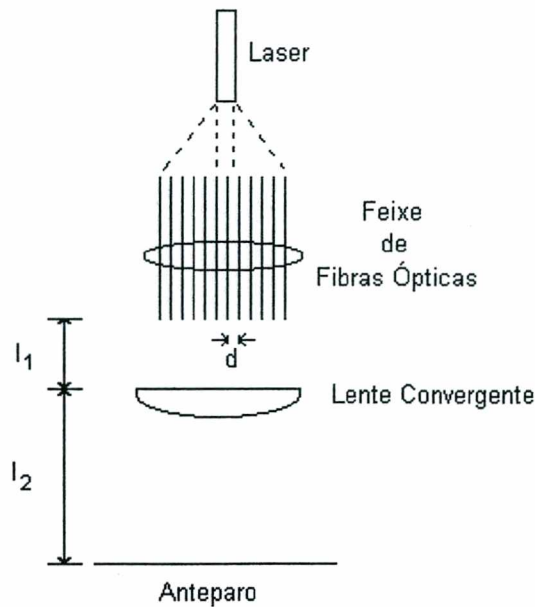


Figura 3.2 Criação do plano de luz através da utilização de fibras ópticas.

Nessa configuração, a linha criada sobre o anteparo possui comprimento “ l ” igual a:

$$l = n \cdot d + 2(NA)(l_1 + l_2) \quad (3.1)$$

Onde:

n : número de fibras que formam o feixe de fibras [adimensional];

d : distância centro à centro das fibras ópticas [mm];

NA : número de abertura da fibra óptica [adimensional];

l_1 : distância entre as fibras e a lente convergente [mm];

l_2 : distância entre a lente convergente e o anteparo [mm].

A vantagem dessa técnica é a produção de uma linha luminosa bastante homogênea em toda a sua extensão. O sistema que utiliza lente cilíndrica para produzir o plano de luz é pior devido ao problema de distribuição da intensidade luminosa não uniforme ao longo da linha. Nesse caso, tem-se geralmente uma distribuição gaussiana causando uma não uniformidade da linha luminosa projetada e diminuição da relação sinal / ruído.

Como terceira alternativa, tem-se a varredura. Nesse caso, o sensor contém um motor que faz a varredura do feixe de laser sobre a superfície do objeto a ser medido através de um espelho colocado sobre seu eixo. Um outro espelho recebe o feixe refletido pela superfície, direcionando-o para o CCD (Figura 3.3).

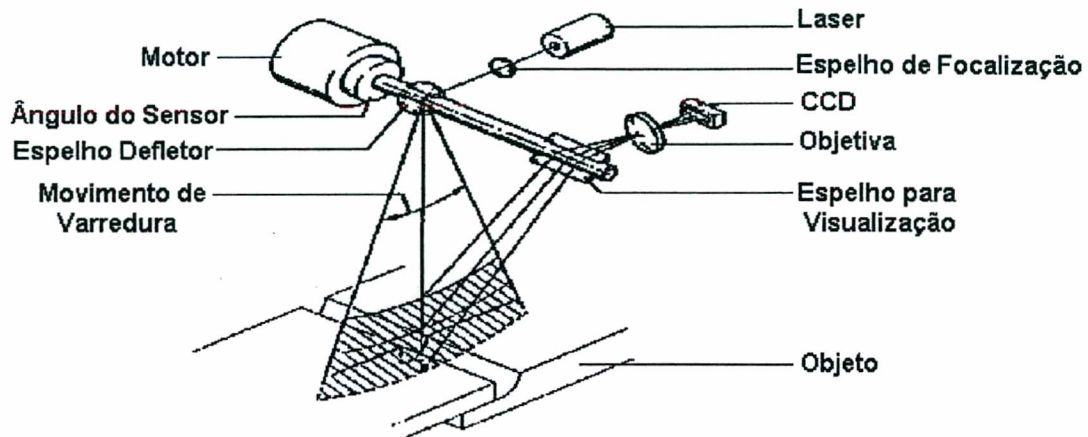


Figura 3.3 Criação do plano de luz através do sistema de varredura.

O perfil do objeto é obtido através da combinação das informações provenientes de uma transformação polar para cartesiana para cada posição angular do eixo (coordenadas "x") com aquelas fornecidas através de uma análise da imagem do CCD (coordenada "z").

A relação sinal / ruído deste tipo de sensor é relativamente grande e o tempo de processamento dos dados relativamente pequeno, fatores que contribuem para uma boa aceitação comercial. Entretanto, uma de suas limitações é o tempo de vida útil, já que é composto de partes mecânicas.

3.2 Análise da Imagem do Sensor Óptico Tipo “Folha de Luz”

Na figura abaixo, tem-se uma representação das imagens obtidas pelo sensor óptico tipo “Folha de Luz” equipado com CCD na medição de duas superfícies distintas: (a) superfície plana e (b) superfície plana com chanfro em “V”.

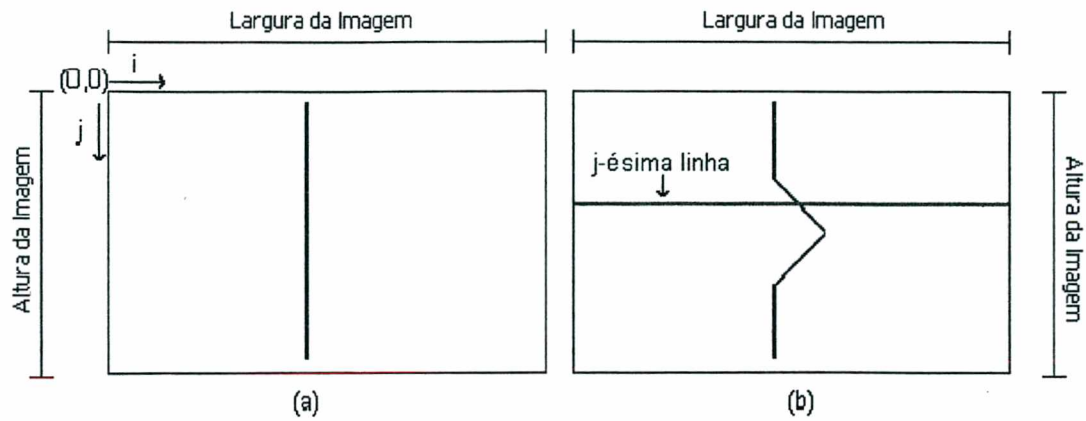


Figura 3.4 Representação de imagens obtidas pelo sensor óptico tipo “Folha de Luz” (com CCD) na medição de duas superfícies distintas: (a) plano e (b) peça com chanfro em “V”.

Observa-se que o chanfro na peça (figura 3.4b) provoca um deslocamento de parte da imagem se comparado com o caso apresentado na figura 3.4a. Esse fenômeno é consequência do princípio de triangulação.

Analisando a distribuição de intensidade luminosa sobre os pixels de uma dada linha da imagem do CCD (por exemplo, a j -ésima linha da figura 3.4) tem-se o seguinte resultado:

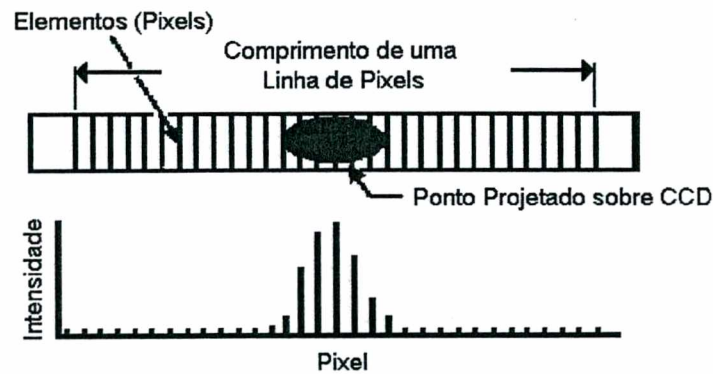


Figura 3.5 Distribuição de intensidade luminosa sobre a j -ésima linha do CCD.

A posição do pico de intensidade luminosa ao longo da linha é calculada através da fórmula do centróide [22]:

$$C_j = \frac{\sum (P_{ij} * i)}{\sum P_{ij}} \quad (3.2)$$

Onde:

C_j : posição do centro do pico de intensidade luminosa da j -ésima linha;

P_{ij} : intensidade luminosa do i -ésimo pixel pertencente à j -ésima linha.

Repetindo o cálculo anterior para todas as linhas da imagem, pode-se determinar a posição do feixe luminoso de cada linha em termos de pixel. Essa posição é dada pelo binômio (C_j, j) .

Com base nas informações de calibração do sensor, esse valor de posição do feixe luminoso na imagem pode ser transformado em coordenadas bidimensionais (“x” e “z”, Figura 3.1).

3.3 Especificação Técnica de um Sensor Óptico Tipo “Folha de Luz”

A especificação de um sensor óptico tipo “Folha de Luz” pode ser feita através de uma análise de parâmetros característicos, normalmente fornecidos pelos fabricantes. A figura 3.6 mostra alguns desses parâmetros.

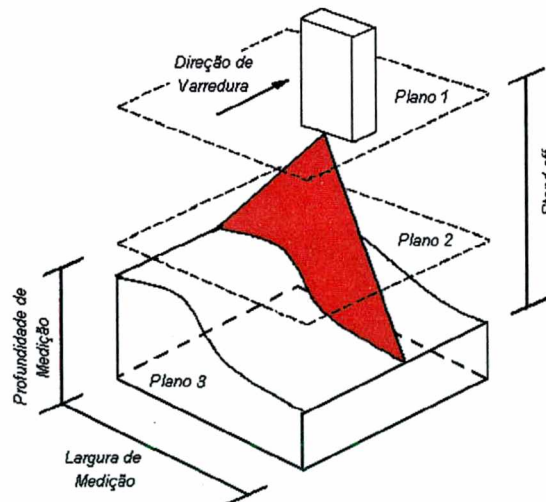


Figura 3.6 Visualização de alguns parâmetros característicos de um sensor óptico tipo “folha de luz” [23].

Profundidade de medição, também designada no meio comercial como sendo a região útil do sensor, é a faixa onde o sensor óptico consegue medir as coordenadas “z” (Figura 3.1) do mensurando. Por limitações físicas do sistema de visualização, fora dessa região nenhum dado é medido.

Com relação à largura de medição, duas especificações podem ser fornecidas: a largura mínima e a largura máxima. A largura de medição mínima é determinada na posição de menor profundidade de medição (plano 2 da figura 3.6) enquanto a largura máxima é dada na posição de maior profundidade de medição (plano 3). A partir dos valores fornecidos pelos fabricantes para esse parâmetro, sabe-se se o comprimento do feixe luminoso poderá varrer todo mensurando em apenas uma passagem do sensor sobre a superfície ou se mais de uma varredura serão necessárias. Nesse último caso, a medição de regiões comuns em cada varredura pode ser necessária de modo que não haja perda de informações relevantes no momento de combiná-las.

A distância entre o início de abertura do feixe luminoso e a metade da profundidade de medição (ponto intermediário entre os planos 2 e 3 da figura 3.6) é denominada de *Stand-off*. A importância desse parâmetro característico está normalmente vinculada à aplicação do sensor, principalmente em locais confinados.

Para exemplificar, suponha que um sensor óptico tipo “Folha de Luz” deva ser especificado para medição do perfil de uma pá de turbina hidráulica (figura 3.7).



Figura 3.7 Fotografia de uma Turbina Hidráulica de Grande Porte

Verifica-se pela figura acima que o volume existente entre pás adjacentes é bem reduzido. Logo, deve-se especificar um sensor cujo *Stand-off* e profundidade de medição sejam compatíveis com essas dimensões de modo a não inviabilizar sua aplicação.

Outros parâmetros característicos de um sensor óptico tipo “folha de luz” que devem ser considerados em uma especificação técnica são:

a) Resolução Lateral: é a resolução do sensor óptico na medição das coordenadas da superfície ao longo da linha luminosa (coordenada “x” da Figura 3.1). Este parâmetro é determinado a partir do número de pixels disponíveis na câmera CCD na direção horizontal (direção “i” da figura 3.4a);

b) Resolução em “Z”: é a resolução do sensor óptico na medição da coordenada “z” (Figura 3.1) da superfície do mensurando. Novamente, tem-se uma relação deste parâmetro com o número de pixels da câmera na direção vertical (direção “j” da figura 3.4a);

c) Linearidade: sensores ópticos tipo “folha de luz” geralmente são não-lineares. Como na técnica de triangulação o CCD visualiza a superfície do mensurando de maneira inclinada em relação ao feixe de projeção, o deslocamento sofrido pela imagem no CCD não apresenta razão de 1:1 com a variação na profundidade. Certos fabricantes, entretanto, fornecem sensores

lineares introduzindo uma correção interna;

d) Incerteza de Medição: é o parâmetro que caracteriza a faixa de valores que podem ser atribuídos ao mensurando (coordenadas da superfície) com determinada probabilidade. Como o sensor é bidimensional, incertezas de medição distintas podem ser atribuídas às suas coordenadas "x" e "z";

e) Taxa de Varredura: é a frequência com que o sensor óptico consegue captar uma imagem;

f) Comprimento de Onda do Laser: dependendo da fonte de laser, duas alternativas são possíveis: comprimentos de onda que tornam a luz visível a olho nu e comprimentos de onda que a tornam invisível a olho nu.

3.4 Construção de um Sensor Óptico Tipo “Folha de Luz” em Laboratório

O sensor óptico utilizado neste trabalho foi desenvolvido no próprio Laboratório de Metrologia e Automatização da UFSC a partir da integração de alguns equipamentos, tais como:

- um laser-diodo: marca Lasiris, modelo SNF-503L-670-30-30°-5°, número de série 0709001, de 668,8 nm de comprimento de onda (visível a olho nu), potência 24 mW, corrente 83 mA e classe IIIa [62];
- uma câmara CCD: marca PULNIX, modelo TM-7CN, formato: 12,7 mm (½ polegada), distância focal da lente da câmera $f = 16$ mm;
- uma lente divergente: marca LASIRIS, modelo 503 L.

A especificação técnica deste sensor é mostrada na Tabela 3.1 abaixo.

Tabela 3.1 Especificação Técnica do Sensor Óptico Desenvolvido em Laboratório

Parâmetros Técnicos	Valor
Profundidade de Medição	50 mm
Largura de Medição Mínima	41,18 mm
Largura de Medição Máxima	58,82 mm
Ângulo de Inclinação	20°
<i>Stand-off</i>	208,98 mm
Distância entre a lente da câmera e seu elemento fotosensor	17,32 mm
Redução da Imagem na distância nominal (<i>Stand-off</i>)	0,0828
Resolução em “Z” na distância nominal (<i>Stand-off</i>)	0,16 mm
Resolução Lateral na distância nominal (<i>Stand-off</i>)	0,17 mm
Resolução Horizontal da câmera CCD	768 pixels
Resolução Vertical da câmera CCD	494 pixels

A partir dos dados calculados, foi projetada uma peça mecânica com o objetivo de fixar os equipamentos listados anteriormente, respeitando os valores de cada parâmetro acima. Uma figura esquemática desta peça é apresentada na figura 3.8.

Esta peça, além de integrar os equipamentos usados no sensor óptico, permite que o sensor desenvolvido seja integrado mecanicamente ao braço de medição conforme é descrito no Capítulo 5.

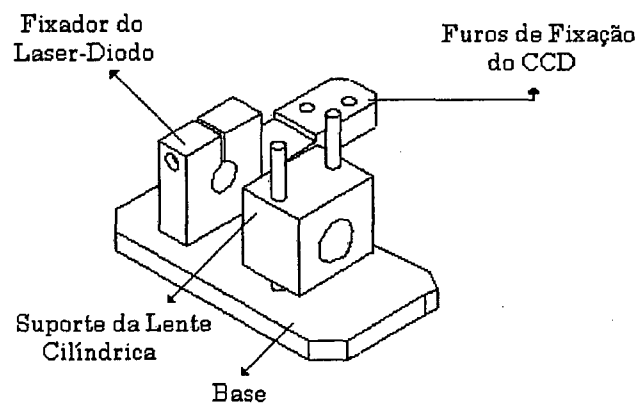


Figura 3.8 Esquema da peça mecânica projetada para fixação dos equipamentos usados no sensor óptico tipo “folha de luz” construído em laboratório.

3.5 Calibração do Sensor Óptico Tipo “Folha de Luz” construído em Laboratório

3.5.1 Principais Fontes de Incerteza de um Sensor Óptico

O desenho esquemático da figura 3.9 mostra uma configuração típica do sensor óptico utilizado nesse trabalho em apenas duas dimensões.

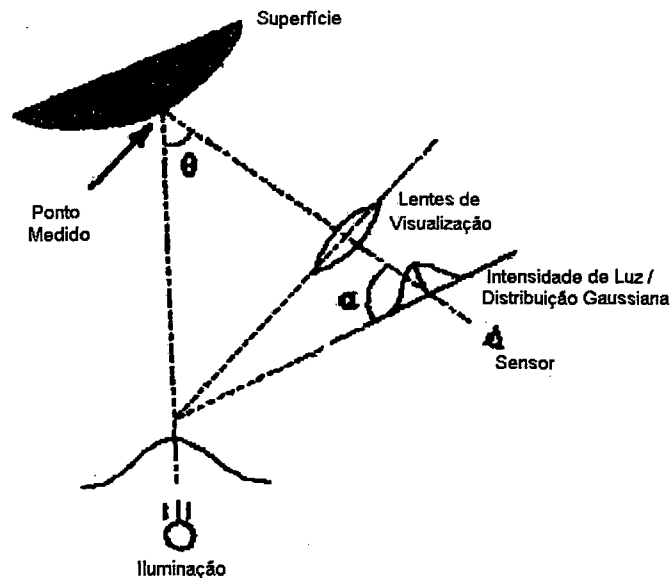


Figura 3.9 Representação Bidimensional da Triangulação Óptica – Destaque para a Curva de Intensidade Luminosa da Imagem como sendo do tipo Gaussiana.

Conforme descrito na Seção 2.2.2, a partir da localização dos pontos B e B' através do método do centróide (Seção 3.2) e do conhecimento de alguns parâmetros do sensor, é possível o cálculo da distância *dist'* (Figura 2.).

Entretanto, *Curless et al* [19] afirmam que os métodos de localização do pico de intensidade luminosa (dentre estes, o centróide) em sensores ópticos por triangulação são precisos somente na medição de superfícies planas de características ópticas (reflexão) uniforme, iluminada por uma fonte de luz incoerente.

Fora dessas condições, esses métodos podem não ser adequados (figuras 3.10 e 3.11), mesmo que o sensor em questão apresente uma resolução infinita e uma calibração perfeita (condições ideais).

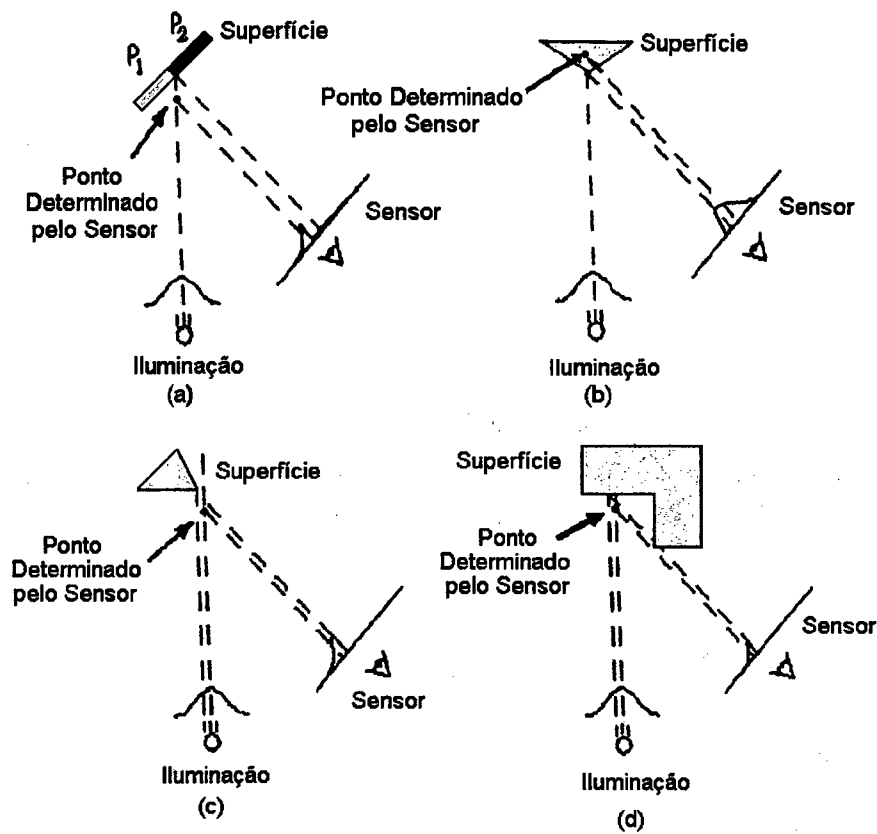


Figura 3.10 Influência das características ópticas e geométricas do mensurando sobre a medição de pontos de sua superfície com um sensor óptico baseado no princípio da triangulação.

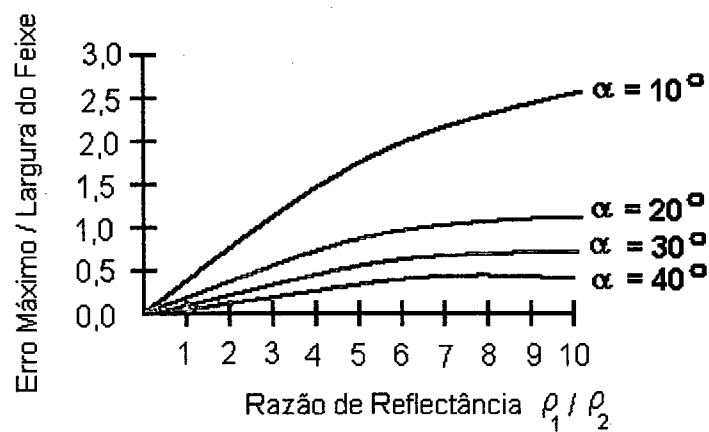


Figura 3.11 Influência da descontinuidade da reflectância da superfície sobre os erros de medição, considerando diversos ângulos de triangulação.

Outra fonte de incerteza do sensor óptico refere-se à utilização de uma luz coerente (por exemplo, laser). Nesse caso, a ocorrência de um fenômeno físico denominado *speckle*¹ pode levar à introdução de ruídos nos dados de medição [40], muito embora técnicas para minimização de seus efeitos sejam conhecidas e aplicadas [10][33][35].

Já *Hülser e Rothe* [34] analisam em seu trabalho a influência da inclinação do feixe de laser em relação à superfície do objeto sobre os resultados da medição. Em uma das análises, desvios radiais de até 0,4 mm foram encontrados na medição de uma esfera metálica (vide figura 3.12) com um sensor de triangulação a laser, sendo o centro dessa esfera ajustado a partir dos pontos medidos e os desvios calculados pelo afastamento de cada ponto em relação à esfera média.

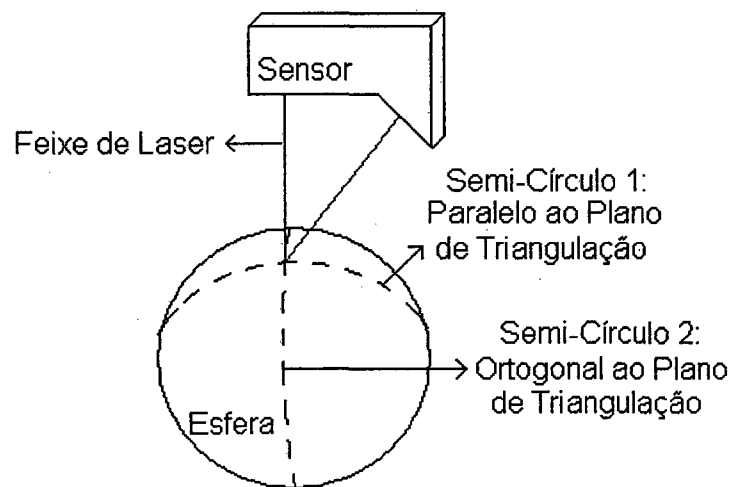


Figura 3.12 Medição de uma esfera metálica em duas direções através de um sensor óptico por triangulação [34].

Efeitos da iluminação ambiente, resolução do CCD, velocidade de medição (taxa de aquisição do CCD), espessura do feixe de laser projetado sobre o mensurando, foco da câmera, distorções das lentes de projeção e

¹ *Speckle* pode ser definida como sendo uma variação aleatória das características da onda da luz refletida, ocasionando a formação de padrões de interferência nas imagens também de forma aleatória. A ocorrência ou não desse fenômeno depende da rugosidade da superfície do mensurando [33].

visualização, variação de temperatura ambiente e a própria calibração do sensor são outras fontes de incerteza que podem ser citadas [37][52][53][58][60].

3.5.2 Calibração do Sensor Óptico Tipo “Folha de Luz”

A calibração do sensor óptico concebido em laboratório foi feita através de um aparato experimental composto pelos seguintes itens:

- Uma mesa de deslocamento micrométrico com curso de 50 mm;
- Um plano metálico pintado com tinta branca fosca;
- Uma base de apoio para o sensor óptico;
- Um suporte metálico em forma de “L”;
- Uma mesa de furos para laboratório de óptica.

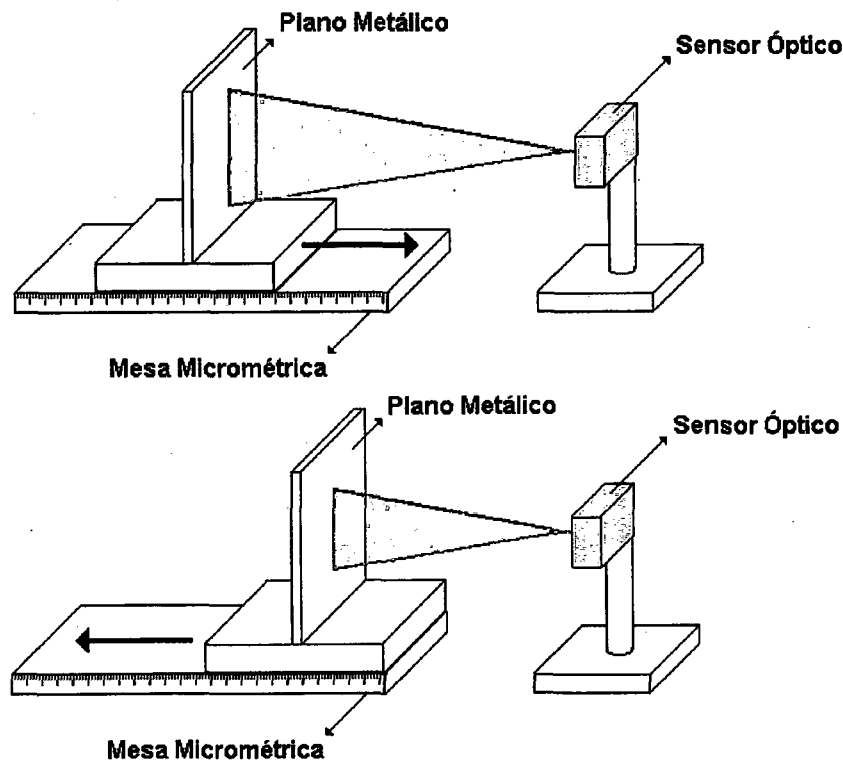


Figura 3.13 Figura esquemática do aparato experimental utilizado na calibração do sensor óptico tipo “Folha de Luz”

A metodologia de calibração adotada é dada pelo seguinte roteiro:

1. Fixa-se a base de apoio sobre a mesa de furos, posicionando sobre esta base o sensor óptico;
2. Em seguida, a mesa de deslocamento micrométrico, o suporte em “L” e o plano metálico são presos entre si e fixados à mesa de furos. A distância inicial entre o sensor óptico e o plano metálico foi ajustada com base no *Stand-off* calculado anteriormente, ou seja, igual a 208,98 mm;
3. Com auxílio de um espelho plano, verifica-se se a superfície do plano metálico se encontra perpendicular ao plano do feixe de luz para diversas posições da mesa micrométrica;
4. Retorna-se à posição inicial da mesa micrométrica (distância sensor / plano metálico igual ao *Stand-off*);
5. Através de um aplicativo computacional desenvolvido especialmente para a calibração, a imagem do feixe refletido pelo plano na posição inicial é capturada, sendo o conjunto $(C_{j,i})$ de cada linha da imagem calculado. A média dos valores C_j e a informação “0 mm” são armazenadas em um arquivo eletrônico;
6. Desloca-se a mesa micrométrica em 1 mm, avançando em direção ao sensor (direção positiva);
7. Nessa posição, uma nova imagem do feixe refletido pelo plano é capturada e os valores C_j calculados e armazenados novamente, juntamente com o dado “+1mm”;
8. Repetem-se os procedimentos 6 e 7 até atingir o fim de curso da mesa micrométrica nessa direção;
9. Reposiciona-se a mesa micrométrica na sua condição inicial (posição “Zero”);
10. Desloca-se a mesa micrométrica em 1 mm, afastando do sensor (direção negativa);
11. Adquire-se a imagem do feixe de laser e calculam-se novos valores de C_j , armazenando-os com a informação “-1 mm”;
12. Repetem-se os procedimentos 10 e 11 até atingir o fim de curso da mesa micrométrica.

Plotando os resultados obtidos para os conjuntos (C_{ij}) em algumas posições da mesa micrométrica, tem-se o gráfico da figura 3.14.

Nota-se por esta figura que os espaçamentos existentes entre duas linhas verticais consecutivas não são constantes. Para valores de largura da imagem negativos, a tendência é das linhas se aproximarem. O inverso é observado na parte de larguras positivas. Esse efeito se deve à triangulação, caracterizando um comportamento não-linear.

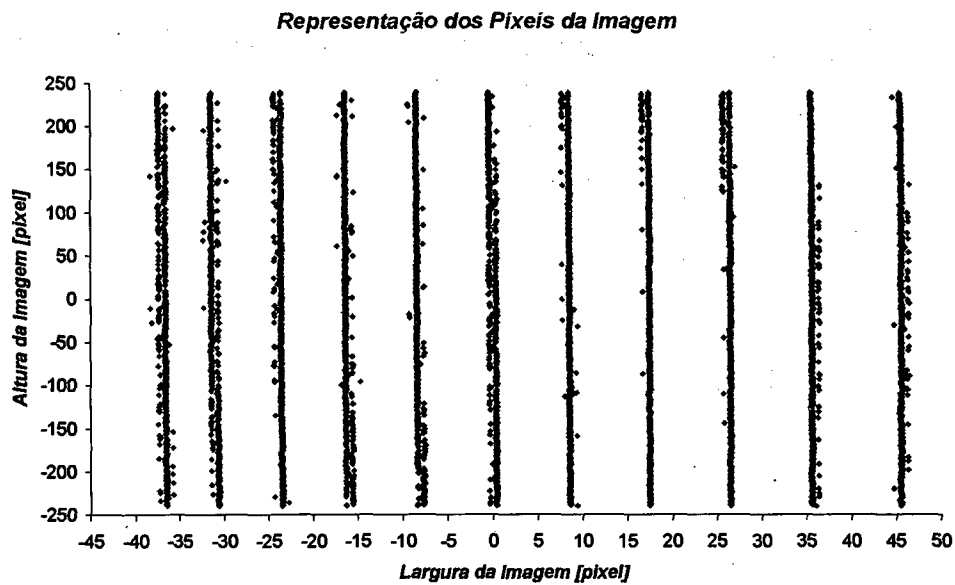


Figura 3.14 Gráfico Contendo os Binômios (C_{ij}) para Diversas Posições da Mesa Micrométrica

Para cada linha vertical da figura um valor médio para largura da imagem foi calculado. Traçando então um novo gráfico desses valores médios e os correspondentes deslocamentos da mesa micrométrica (dados armazenados durante a calibração), tem-se:

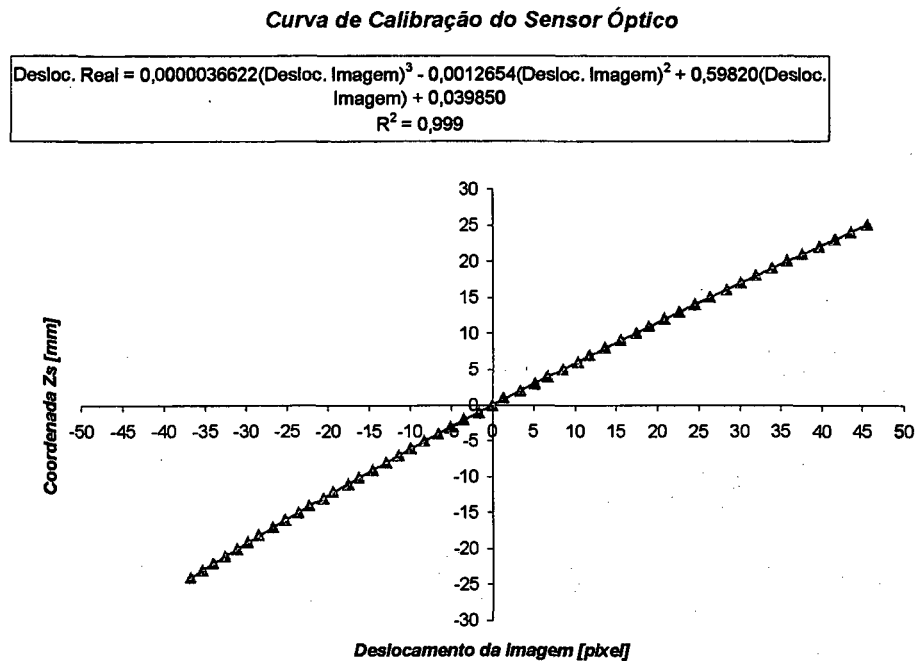


Figura 3.15 Curva de Calibração do Sensor Óptico – Relação entre Deslocamento Lateral da Imagem (em pixels) e a Distância Real do Objeto (Profundidade – em mm)

A partir dos pontos plotados na figura 3.15, ajustou-se uma linha de tendência do tipo polinomial de grau 3, determinando sua equação. Através dessa equação, estabeleceu-se uma relação entre os deslocamentos laterais de cada pixel da imagem (C_j) com a respectiva coordenada “ Z_s ” (profundidade – em mm) do sensor.

Para se determinar a coordenada “ X_s ”, a componente “j” do binômio ($C_{j,j}$) deve ser multiplicada por um fator de correção que é função do valor de “ Z_s ”. Esse fator considera os efeitos da aproximação ou afastamento do objeto em relação ao sensor sobre a imagem visualizada pelo CCD. Durante a aproximação, a imagem tende a crescer enquanto no afastamento, tem-se sua diminuição.

O gráfico da figura 3.16 foi construído a partir de um ensaio experimental onde uma peça de dimensão conhecida foi medida pelo sensor em diversas posições de profundidade e o número de pixels visualizados pelo sensor na direção da altura da imagem determinado.

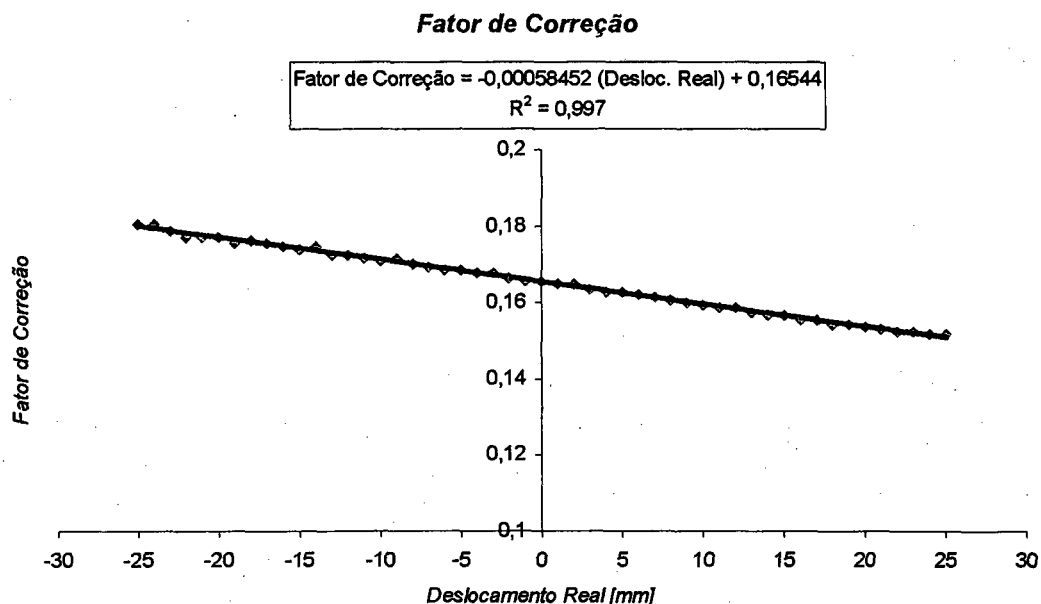


Figura 3.16 Curva de Calibração do Sensor Óptico – Determinação do fator de correção multiplicativo da componente "j" do binômio ($C_{j,j}$) em função da profundidade do objeto (mm).

Nesse caso, uma relação linear foi estabelecida, conforme mostra a figura acima.

Sendo assim, a medição de coordenadas bidimensionais através do sensor óptico foi viabilizada, sendo ambas as equações (figuras 3.15 e 3.16) transcritas para um programa computacional capaz de adquirir e tratar as imagens obtidas pela projeção do feixe de laser sobre a superfície do mensurando.

Outras formas de calibração deste tipo de sensor são descritas na bibliografia [26][27][57].

3.5.3 Estimativa da Incerteza do Sensor Óptico

Analisando a figura 3.14, nota-se que as linhas verticais obtidas na calibração do sensor não são perfeitas, apresentando uma certa dispersão em relação às suas linhas médias imaginárias. Sabendo que o polinômio que permite o cálculo da coordenada " Z_s " (figura 3.15) é ajustado a partir dos

valores médios de cada linha, torna-se imperativo estimar quais os efeitos dessa dispersão sobre a medição da profundidade.

Para tanto, adotou-se a seguinte metodologia:

1. Calculou-se o desvio padrão dos pontos ao longo de cada linha vertical em relação ao valor médio;
2. Com base nesses valores de desvio padrão, utilizou-se a equação da figura 3.15, tomando como dados de entrada (deslocamento da imagem – em pixel):
 - a) O valor médio de cada linha vertical somado ao seu respectivo desvio padrão;
 - b) O valor médio de cada linha vertical diminuído de seu respectivo desvio padrão;
3. Obteve-se então uma variação dos valores da coordenada “ Z_s ” em cada linha vertical. Dentre esses valores, adotou-se o maior ($\pm 0,3$ mm) como sendo a incerteza padrão do sensor óptico na medição da profundidade;
4. Considerando a incerteza de “ Z_s ”, repetiu-se o passo 2, agora para a equação da figura 3.16. Novamente, variações nos fatores de correção foram observados, sendo a maior delas, considerada na estimativa da incerteza de “ X_s ”. Nesse caso, a incerteza dessa coordenada ficou em $\pm 0,1$ mm.

Capítulo 4

Braço de Medição (Máquina de Medir por Coordenadas Portátil)

4.1 Princípio de Funcionamento de um Braço de Medição

Atualmente, observa-se uma crescente utilização das máquinas de medir por coordenadas com eixos cartesianos (MMC) em medições geométricas no ambiente industrial. Segundo *Kovac et al* [55], as principais vantagens das MMC frente outros sistemas de medição neste tipo de aplicação são a sua configuração cinemática simples (eixos perpendiculares) e sua baixa incerteza de medição. Contudo, as MMC são relativamente lentas e pesadas, o que dificulta o seu transporte, necessitam de um local para instalação fixa, além de normalmente necessitarem de uma mesa de medição própria onde o mensurando é posicionado (Figura 4.1).

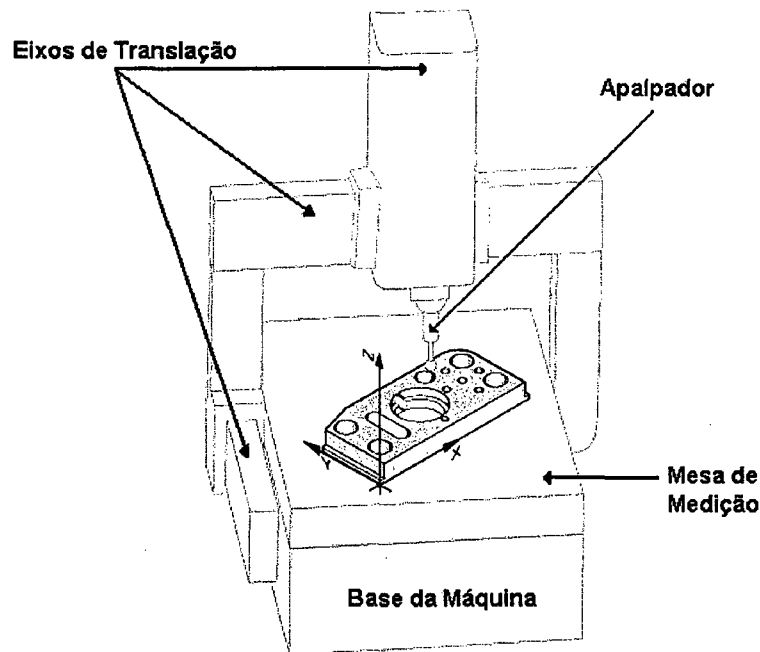


Figura 4.1 Máquina de medir por coordenada de eixos cartesianos.

Visando tornar as MMC mais rápidas e convenientes para atuação em ambientes industriais, desenvolveram-se os chamados “robôs de medição”. A principal diferença entre as MMC comuns e esses “robôs” é a inexistência de uma mesa de medição. Porém, as limitações quanto à necessidade de uma instalação fixa e dificuldade para transporte do sistema de medição para o local onde o mensurando se encontra ainda são mantidas. Introduz-se então o braço de medição.

Um braço de medição, também conhecido como máquina de medir por coordenadas portátil, é um sistema de medição manual, composto de eixos rotativos, podendo ser encontrado em duas configurações principais (antropóide e SCARA) e cujas incertezas de medição são maiores se comparadas às MMC convencionais [55].

Na primeira configuração tem-se juntas articuladas na extremidade de segmentos retos que possibilitam movimentos tal como o braço de um ser humano. Na Figura 4.2, visualiza-se uma fotografia deste tipo de configuração e uma representação do seu volume de trabalho. Normalmente, os sistemas antropóides dispõem de 6 graus de liberdade. Contudo, variações são possíveis.

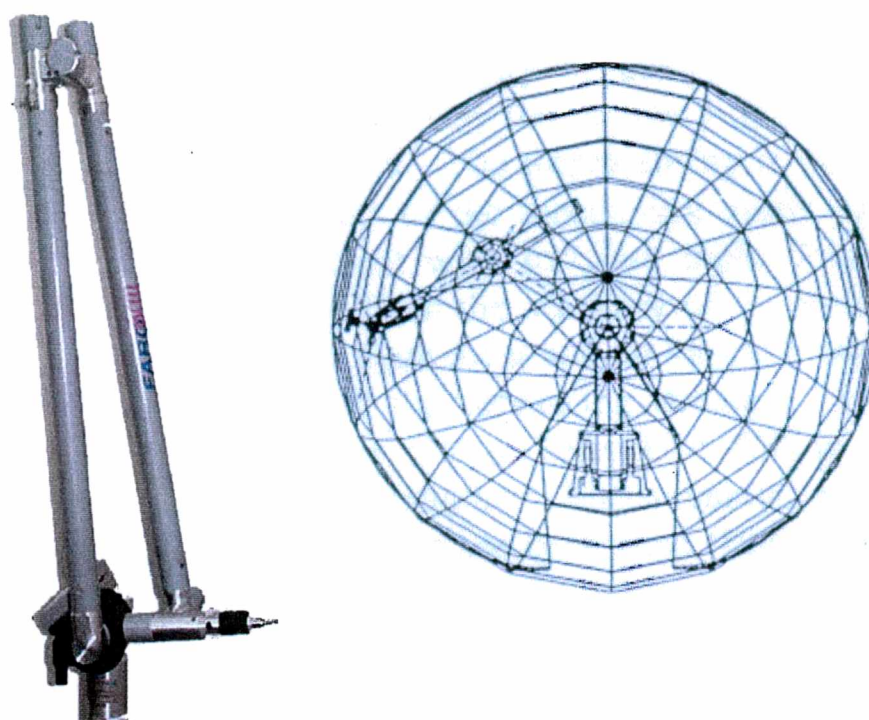


Figura 4.2 Braço de Medição – Configuração Antropóide e seu volume de trabalho.

Na tabela abaixo, tem-se uma comparação qualitativa entre um braço de medição antropóide, “robôs de medição” e MMC convencionais feita por Kovac *et al* [56].

Tabela 4.1 Comparação Qualitativa entre braço de medição antropóide, robôs de medição e MMC convencionais [56 - Adaptado].

	Braço de Medição Antropóide	Robôs de Medição	MMC Convencionais
Flexibilidade	Muito alta	Muito alta	Alta
Incerteza de Medição	Mediana	Mediana	Baixa
Preço	Mediano	Alto	Muito alto
Tempo de Medição	Mediano	Mediano	Alto
Facilidade para Integrar à Linha de Produção	Sim	Sim	Condicional
Utilização em Ambiente Industrial	Sim	Sim	Condicional
Portabilidade	Sim	Condicional	Não

Já na configuração SCARA ("Selective Compliance Assembly Robot Arm"), tem-se um sistema híbrido de movimentação (cilíndrico e horizontal) o que permite uma boa maneabilidade, incerteza de medição reduzidas e velocidade de operação mediana.

Contudo, a configuração SCARA não permite uma grande flexibilidade no plano vertical. A Figura 4.3 mostra uma ilustração contendo o princípio dessa configuração e seu volume de trabalho.

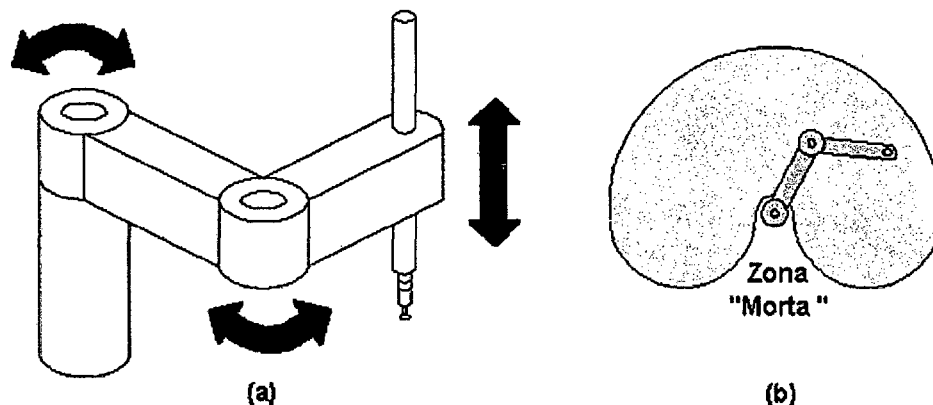


Figura 4.3 Braço de Medição – Configuração SCARA e seu volume de trabalho.

Na extremidade de um braço de medição há um apalpador rígido. Portanto, para se medir as coordenadas de um ponto sobre a superfície deve-se posicionar manualmente o apalpador sobre o mensurando e então fazer a leitura das coordenadas indicadas no mostrador do equipamento (caso esteja disponível) ou através da tela de um computador. Nesse caso, a comunicação do braço com o computador é feita com auxílio de softwares especialmente desenvolvidos para tal aplicação, permitindo, não somente, a visualização dos dados mas, se necessário, um pós-processamento adequado.

A determinação das coordenadas dos pontos apalpados é feita através do cálculo da posição e orientação do sistema de coordenadas local do apalpador em relação a um sistema de coordenadas global do braço de medição, como apresentado na Figura 4.4.

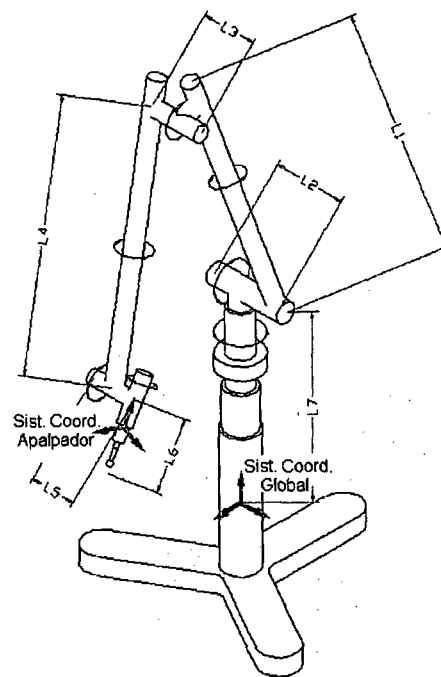


Figura 4.4 Determinação da posição e orientação do sistema de coordenadas local do apalpador em relação ao sistema de coordenadas global do braço.

Para tanto, matrizes de transformação de coordenadas são aplicadas a partir das informações de rotação (e translação – configuração SCARA) de cada junta e do comprimento de cada segmento do braço (Figura 4.4). O ângulo de rotação de uma junta é medido por um transdutor angular (*encoder*) de precisão. Na medição do deslocamento de translação, escalas eletro-ópticas podem ser utilizadas.

4.2 Estado da Arte

Atualmente, tem-se uma certa variedade de modelos de braços de medição disponíveis comercialmente. A tabela 4.2 mostra alguns desses braços.

Tabela 4.2 Braços de medição disponíveis comercialmente [55 - Adaptado].

Braço de Medição	Nº de Eixos	Massa [kg]	Características Metrológicas	Volume de Trabalho – Diâmetro da Esfera
Micro-Scribe- 3DX	5	-	Incerteza: $\pm 0,23$ mm (Esfera ANSI 100 pontos)	1275 mm
Romer 2200	6	11	Desvio padrão: $\leq 0,05$ mm	2200 mm
Addison Addata-Plus	5	-	-	-
FaroArm Série Silver 08-TK	6	42	Incerteza Pontual (2σ): $\pm 0,076$ mm (ANSI B89)	2400 mm
Poly omega 6/1 Handy	6	-	$\pm 0,1$ mm / m	1000 mm
Garda CMS Digit	6	23	Incerteza: $\pm 0,1$ / 1000 mm Repetitividade: $\pm 0,05$ mm	x = 3200 mm, y = 3200 mm, z _{min} = 0, z _{max} = 2400 mm
Zett-Mess AMPG	6	11,5	Tolerância: 0,08 mm	2400 mm
Zeiss ScanMax (configuração SCARA)	3	-	Erro Máximo: 0,005 mm	200 mm x 200 mm x 500 mm
Vectoron VMC-5243	6	7	Incerteza: $\pm 0,1$ / 400 mm Repetitividade: $\pm 0,05$ mm	x = 2500 mm, y = 2500 mm, z = 2370 mm

4.3 Calibração de um Braço de Medição

As incertezas com que são determinadas as coordenadas de um ponto qualquer no espaço através do braço de medição resultam da ação combinada dos seguintes fatores [56]:

- Incerteza dos transdutores angulares (*encoders*) existentes em cada junção dos segmentos que compõem o braço;
- Erro de determinação da referência (também denominado de erro de *offset*);
- Incerteza dos comprimentos de cada segmento do braço;
- Dilatação dos segmentos provocada pela variação de temperatura local [25];
- Folgas nas junções;
- Rigidez (deformações em virtude do peso próprio e durante deslocamentos);
- Histerese;
- Calibração do apalpador (compensação do raio);
- Força de contato;

- Aproximações numéricas feitas pelo programa gerenciador (erros de truncamento).

Apesar de alguns fabricantes utilizarem normas de Máquinas de Medir por Coordenadas convencionais para calibrar seus sistemas de medição, uma metodologia específica deve ser adotada para braços de medição [55].

Entretanto, não se tem conhecimento, até o presente momento, de nenhum documento nacional ou internacional que regulamente a calibração de tais sistemas. O resultado é uma não uniformidade na estimativas das incertezas (Tabela 4.2) e o estabelecimento de diferentes métodos de calibração entre os fabricantes e usuários.

O método da figura 4.5, por exemplo, usa um dispositivo especial formado por uma barra contendo um conjunto de esferas, furos e blocos padrões em posições pré-determinadas. Esse dispositivo é montado sobre uma braço telescópico vertical, ajustável no espaço.

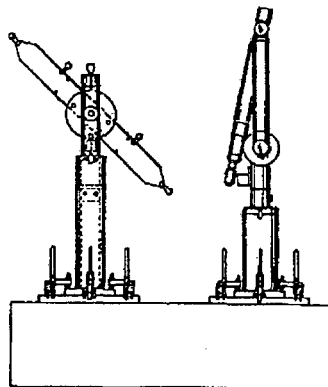


Figura 4.5 Calibração de Braços de Medição através de um dispositivo especial formado por uma barra e um braço telescópico vertical.

Para a calibração, tanto o dispositivo quanto o braço de medição são colocados sobre uma mesa de granito. Através de um programa computacional especial, os dados relativos às medições dos padrões da barra em diferentes posições e orientações dentro do volume de trabalho do braço são processados e suas incertezas estimadas.

Outro método utilizado em calibrações de braços de medição é

apresentado na figura 4.6. Trata-se de uma barra de esferas (*ball bar*) adaptada para sistemas de eixos rotativos. Nesse caso, o apalpador mecânico é posicionado em um soquete cônico existente em uma das extremidades da *ball bar* enquanto, na extremidade oposta, uma esfera metálica é acoplada ao braço de medição através de uma base magnética.

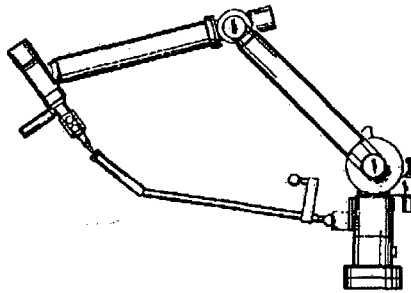


Figura 4.6 Calibração de Braços de Medição através de "ball bar" adaptado para sistemas de medição por coordenadas com eixos rotativos.

Com esse aparato, um comprimento fixo disposto em diferentes posições e orientações dentro do volume de trabalho do braço é medido e o módulo do vetor formado entre o centro da esfera da base magnética e o centro da esfera do apalpador é calculado, devendo o mesmo permanecer constante durante toda a calibração.

Em um terceiro método, utiliza-se uma barra cerâmica sobre a qual desloca-se um dispositivo especial capaz de ser acoplado ao braço de medição. O deslocamento deste dispositivo é medido tanto por um interferômetro localizado próximo à barra (Figura 4.7) quanto pelo próprio braço, sendo esses dados comparados e usados para calibração.

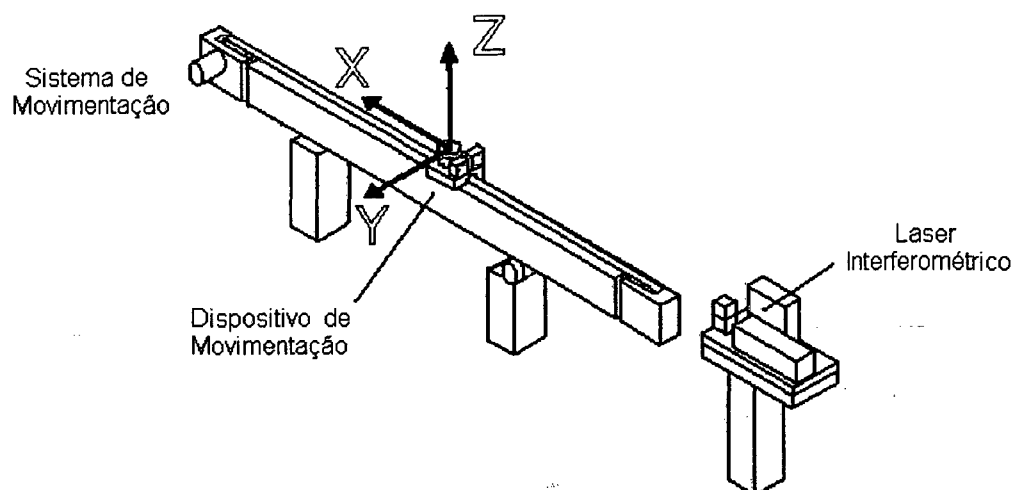


Figura 4.7 Calibração de Braços de Medição com auxílio da Interferometria.

Como nos métodos anteriores, a barra cerâmica deve ser disposta em diferentes posições e orientações dentro do volume de trabalho do braço durante a calibração.

Para braços na configuração SCARA com três eixos (dois de rotação e um de translação), o procedimento de calibração consiste em medir elementos geométricos com um sistema de apalpação montado [55]. Esses elementos são escolhidos de forma que seja possível a identificação dos parâmetros do apalpador, podendo ser anéis padrão com diâmetros externos e internos bem conhecidos, blocos padrão com furos, superfícies paralelas, etc (Figura 4.8).

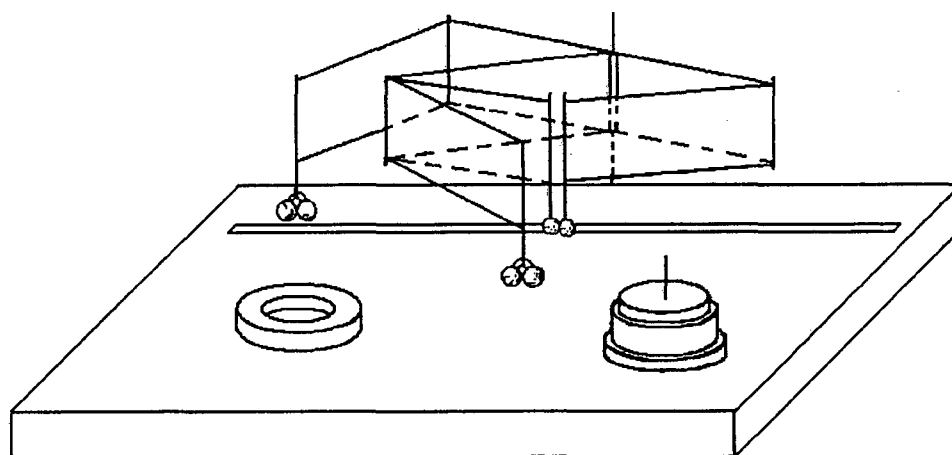


Figura 4.8 Calibração de Braços de Medição de configuração SCARA.

4.4 Braço de Medição Utilizado

No presente trabalho foi utilizado um braço de medição de propriedade da COPEL (Companhia de Eletricidade do Paraná) cuja especificação técnica fornecida pelo fabricante [32] é dada por:

- Fabricante: Faro;
- Modelo: Silver 08 - TK;
- Volume de Trabalho (diâmetro da esfera): 2,4 m;
- Incerteza 2σ na medição de um ponto no volume de trabalho: $\pm 0,076$ mm;
- Graus de Liberdade: 6;
- Número de eixos: 6;
- Massa: 42 kg;
- Apalpadores: 2 apalpadores rígidos esféricos ($\phi 1/4''$), 1 apalpador rígido esférico ($\phi 1/8''$), 1 apalpador rígido pontiagudo;
- Compensação de Temperatura: o braço de medição possui transdutor de temperatura visando fazer a compensação da variação térmica do ambiente durante a medição por software;
- Material: os segmentos do braço de medição são feitos de alumínio.
- Configuração: antropóide

Este braço de medição é freqüentemente utilizado pela COPEL em trabalhos de digitalização de pás de turbinas hidráulicas. É de se esperar, portanto, que o seu certificado de calibração esteja dentro do prazo de validade ou, no pior dos casos, que tenha vencido recentemente. Entretanto, como não se detinha tal informação, resolveu-se estimar a incerteza do braço de medição a partir dos valores de catálogo, ou seja: $U_{95\%} = \pm 0,076$ mm.

Capítulo 5

Integração do Sensor Óptico Tipo “Folha de Luz” ao Braço de Medição

Conforme citado anteriormente, este trabalho prevê a integração de dois sistemas de medição distintos - um braço de medição mecânico e um sensor óptico tipo "Folha de Luz" - permitindo que formas livres tridimensionais sejam medidas, sem contato.

Para tanto, duas etapas são necessárias: integração mecânica e integração numérica, ambas descritas neste capítulo.

Antes porém, deve-se estabelecer quais os aspectos funcionais desejados para o conjunto braço-sensor.

5.1 Aspectos Funcionais do Sistema de Medição Integrado

Após uma análise do princípio de funcionamento e das características técnicas do braço mecânico e do sensor óptico, as principais características funcionais do sistema integrado são definidas. São elas:

- Volume de Medição: o sistema integrado deve manter o mesmo

volume de medição do braço mecânico não devendo haver perdas significativas em função do acoplamento do sensor óptico;

- Programa Computacional do Sistema: o sistema integrado deverá ter suas informações gerenciadas por um novo programa computacional especialmente desenvolvido. Este programa deve ser capaz de conjugar os dados do sensor óptico e do braço de medição, tornando viável sua aplicação metrológica;
- Comandos: os comandos para aquisição e processamento da imagem do sensor óptico e para combinação dessas informações com os dados do braço mecânico devem ser efetuados através dos botões existentes no próprio braço;
- Aquisição das Informações do Sensor: os dados do sensor devem ser adquiridos através de uma placa de aquisição de imagens pertencente ao Labmetro (Laboratório de Metrologia e Automação - UFSC), fabricante Matrox, modelo Pulsar;
- Aquisição das Informações do Braço: os dados do braço (posição e orientação) devem ser adquiridos através de uma porta serial usando protocolos específicos fornecidos pelo fabricante;
- Operação: todo o sistema deve ser movimentado e operado manualmente, ou seja, o posicionamento e orientação do sistema e o comando de medição são atribuições do operador;
- Dados da Medição: as coordenadas tridimensionais da nuvem de pontos de um mensurando qualquer devem ser fornecidas através de um arquivo computacional de dados (por exemplo, "Dados3D.dat");
- Apalpador Mecânico: o apalpador a ser utilizado no braço deve ser o esférico ($\phi 1/4"$), fornecido pelo fabricante do braço (FARO). Em caso de necessidade de utilização de um outro tipo de apalpador, ajustes no programa gerenciador do sistema e do braço precisam ser feitos de forma a não comprometer os resultados da medição;
- Superfície do Mensurando: em função das características do sensor, a superfície do mensurando não pode ser reflexiva ao laser. Se necessário, um *spray* branco fosco deve ser aplicado à superfície medida. Revelador usado em micrografia funciona bem e pode ser

facilmente removido a posteriori;

- Iluminação Externa: o sistema integrado deve ser utilizado preferencialmente em ambientes com pouca ou nenhuma iluminação externa;
- Calibração dos Sistemas de Medição: tanto o sensor óptico quanto o braço de medição devem estar dentro do seu prazo de validade de calibração;
- Temperatura Ambiente para Utilização do Sistema: entre 20 °C e 30 °C.

Todos esses aspectos são considerados durante as fases de integração (seções 5.2 e 5.3), servindo de diretrizes para o planejamento e execução das mesmas.

5.2 Integração Mecânica do Sensor Óptico Tipo “Folha de Luz” ao Braço Mecânico de Medição

Como o sensor óptico utilizado no trabalho foi concebido no próprio Labmetro, seu acoplamento mecânico ao braço de medição é feito através do mesmo dispositivo apresentado na figura 3.8.

Como características de projeto desta peça, citam-se:

- massa reduzida: necessária uma vez que o sistema de medição integrado deve ser operado manualmente. Nesse caso, o valor final obtido para a estrutura foi de 400 g, valor este considerado razoável;
- rigidez elevada;
- facilidade de fabricação;
- facilidade de montagem / desmontagem;
- fixação dos componentes do sensor adequada: o dispositivo permite uma boa fixação tanto da fonte de laser quanto do CCD, garantindo que os parâmetros técnicos do sensor, apresentados na Tabela 3.1, não sofram alterações durante a utilização do sistema integrado;

- acoplamento simplificado: o sensor óptico é fixado no braço de medição através de parafuso, aproveitando a existência de um furo rosqueado localizado na base do apalpador mecânico, diametralmente oposto ao punho, conforme mostra a Figura 5.1;
- dimensões reduzidas: além de massa reduzida, o dispositivo de fixação apresenta as dimensões adequadas, o que facilita a sua movimentação e o posicionamento durante as medições (123 mm x 125 mm x 15 mm).



Figura 5.1 Fotografia da base do apalpador mecânico do braço de medição. Detalhe para o furo de fixação do dispositivo.

A Figura 5.2 apresenta uma fotografia do sensor óptico montado e acoplado ao braço mecânico.



Figura 5.2 Fotografia do acoplamento mecânico do sensor óptico tipo "folha de luz" ao braço de medição FARO.

5.3 Integração Numérica do Sensor Óptico Tipo “Folha de Luz” ao Braço Mecânico de Medição

Para o sistema de medição integrado, podem-se definir três sistemas de coordenadas, conforme apresentado na figura 5.3:

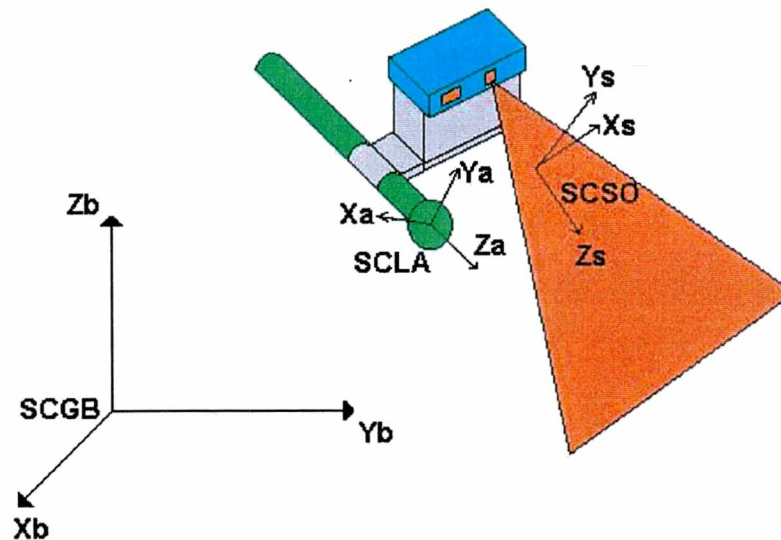


Figura 5.3 Representação Esquemática dos Sistemas de Coordenadas Envolvidos no Sistema Integrado Braço / Sensor Óptico.

Onde:

SCGB - Sistema de Coordenadas Global do Braço;

SCLA - Sistema de Coordenadas Local do Apalpador Mecânico;

SCSO - Sistema de Coordenadas do Sensor Óptico.

O SCGB é um sistema de coordenadas fixo cuja posição e orientação são definidas com auxílio do braço de medição através de uma rotina computacional oferecida pelo seu fabricante, sendo a principal referência do conjunto integrado.

Já o SCLA é um sistema móvel, definido sobre o apalpador mecânico, sendo sua posição dada pelas coordenadas do centro da esfera de apalpação e sua orientação, pelos ângulos de rotação do próprio apalpador. Essas informações são calculadas e disponibilizadas continuamente pelo braço de

medição.

Por sua vez, o SCSO é um sistema de coordenadas pertencente ao sensor óptico e que tem como característica principal o fato de dois de seus eixos estarem contidos no plano de luz, sendo o terceiro eixo perpendicular a esses. Estando o sensor fixado à base do apalpador mecânico, sua posição e orientação são variáveis em relação ao SCGB. Porém, ao contrário do SCLA, essas informações não estão disponíveis a priori.

Como a medição tridimensional de uma superfície qualquer com o sistema integrado somente é possível se as coordenadas medidas em relação ao SCSO puderem ser transformadas para o SCGB, verifica-se que a determinação (ou calibração) da posição e orientação do sensor óptico em relação ao apalpador mecânico - ou seja, em relação ao SCLA - é necessária, sendo esta etapa denominada aqui integração numérica.

5.3.1 Modelo Matemático para Determinação dos Parâmetros de Posição e Orientação do Sensor Óptico em Relação ao Apalpador Mecânico

O modelo matemático utilizado nessa determinação baseia-se na obtenção de equações não-lineares provenientes da combinação de duas transformações de coordenadas consecutivas: a primeira, do SCSO para o SCLA e a segunda, do SCLA para o SCGB.

Equações de transformação de coordenadas de um ponto qualquer do SCSO para o SCLA:

São duas as operações realizadas durante uma transformação de coordenadas entre sistemas coordenados distintos: a translação e a rotação.

A translação do SCSO para o centro do SCLA pode ser descrita matricialmente por [16]:

$$\begin{bmatrix} \overline{X_{SA}} \\ \overline{Y_{SA}} \\ \overline{Z_{SA}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -X_{oA} \\ 0 & 1 & 0 & -Y_{oA} \\ 0 & 0 & 1 & -Z_{oA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Onde:

X_{oA} , Y_{oA} e Z_{oA} – Coordenadas do centro do SCSO em relação ao SCLA;

X_S , Y_S , Z_S – Coordenadas de um ponto medido no SCSO;

O vetor resultante representa as coordenadas de um ponto qualquer transladado do sistema de coordenadas do sensor para o sistema de coordenadas local do apalpador. Resta alinhar ambos os sistemas através de operações de rotação:

a) Rotação em torno do eixo "Zs" de um ângulo θ_Z [16]:

$$R_{\theta_Z} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_Z) & \sin(\theta_Z) & 0 \\ -\sin(\theta_Z) & \cos(\theta_Z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

b) Rotação em torno do eixo "Ys" de um ângulo θ_Y [16]:

$$R_{\theta_Y} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_Y) & 0 & -\sin(\theta_Y) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta_Y) & 0 & \cos(\theta_Y) \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

c) Rotação em torno do eixo "Xs" de um ângulo θ_X [16]:

$$R_{\theta_X} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_X) & \sin(\theta_X) \\ 0 & -\sin(\theta_X) & \cos(\theta_X) \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

A matriz R representa o resultado das três rotações [16]:

$$R = R_{\theta_Z} \cdot R_{\theta_Y} \cdot R_{\theta_X} \quad (5.5)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\theta_Z)\cos(\theta_Y) & \sin(\theta_Z)\cos(\theta_X) + \cos(\theta_Z)\sin(\theta_Y)\sin(\theta_X) & \sin(\theta_Z)\sin(\theta_X) - \cos(\theta_X)\cos(\theta_Z)\sin(\theta_Y) \\ -\sin(\theta_Z)\cos(\theta_Y) & \cos(\theta_Z)\cos(\theta_X) - \sin(\theta_X)\sin(\theta_Y)\sin(\theta_Z) & \sin(\theta_X)\cos(\theta_Z) + \sin(\theta_Y)\sin(\theta_Z)\cos(\theta_X) \\ \sin(\theta_Y) & -\sin(\theta_X)\cos(\theta_Y) & \cos(\theta_Y)\cos(\theta_X) \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Nota-se que as rotações são efetuadas obedecendo-se a "regra da mão direita".

Logo, a equação que rege a transformação de coordenadas entre SCSO (x_S, y_S, z_S) e SCLA (x_A, y_A, z_A) é:

$$\begin{bmatrix} X_{SA} \\ Y_{SA} \\ Z_{SA} \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{oA} \\ Y_{oA} \\ Z_{oA} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Onde:

X_{SA} , Y_{SA} e Z_{SA} – Coordenadas de um ponto transformado do SCSO para o SCLA.

Os valores das coordenadas X_{oA} , Y_{oA} e Z_{oA} bem como os ângulos de rotação θ_x , θ_y e θ_z não são conhecidos, devendo ser determinados.

Equações de Transformação de Coordenadas de um Ponto Qualquer do SCLA para o SCGB

De forma similar ao que foi apresentado acima, a transformação de coordenadas de um ponto qualquer do SCLA para o SCGB é dada por [16]:

$$\begin{bmatrix} X_{AB} \\ Y_{AB} \\ Z_{AB} \end{bmatrix} = \hat{R} \cdot \begin{bmatrix} X_{SA} \\ Y_{SA} \\ Z_{SA} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{oB} \\ Y_{oB} \\ Z_{oB} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Sendo:

$$\hat{R} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_z) & \sin(\theta_z)\cos(\hat{\theta}_x) & \sin(\theta_z)\sin(\hat{\theta}_x) \\ -\sin(\theta_z)\cos(\theta_x) & \cos(\theta_z)\cos(\theta_x)\cos(\hat{\theta}_x) - \sin(\theta_x)\sin(\hat{\theta}_x) & \sin(\hat{\theta}_x)\cos(\theta_z)\cos(\theta_x) + \sin(\theta_x)\cos(\hat{\theta}_x) \\ \sin(\theta_x)\sin(\theta_z) & -\cos(\hat{\theta}_x)\sin(\theta_x)\cos(\theta_z) - \sin(\hat{\theta}_x)\cos(\theta_x) & \cos(\hat{\theta}_x)\cos(\theta_x) - \sin(\theta_x)\cos(\theta_z)\sin(\hat{\theta}_x) \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

e

X_{oB} , Y_{oB} e Z_{oB} – Coordenadas do centro do SCLA em relação ao SCGB.

Nota-se, nesse caso, que, ao invés de se realizar uma rotação sobre cada eixo, fazem-se duas rotações em torno de “ x_B ” e uma em torno de “ z_B ”. Este procedimento foi adotado em função de uma descrição existente no manual do fabricante do braço de medição [32], que opera e fornece os dados deste modo.

Equações de Transformação de Coordenadas de um Ponto Qualquer do SCSO para o SCGB

Combinando as Equações 5.7 e 5.8, tem-se uma nova formulação capaz de transformar as coordenadas de um ponto medido pelo sensor óptico para o sistema de coordenadas global do braço (SCGB).

$$\begin{bmatrix} X_{SB} \\ Y_{SB} \\ Z_{SB} \end{bmatrix} = \hat{R} \cdot \left(R \cdot \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{oA} \\ Y_{oA} \\ Z_{oA} \end{bmatrix} \right) - \begin{bmatrix} X_{oB} \\ Y_{oB} \\ Z_{oB} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

5.3.2 Metodologia para Determinação dos Parâmetros de Posição e Orientação do Sensor Óptico em Relação ao Apalpador Mecânico

A metodologia para a determinação dos parâmetros de transformação de coordenadas do SCSO para o SCLA baseia-se em duas medições consecutivas de uma esfera de rolamento de 50 mm de diâmetro e erro de forma (esfericidade) igual a 34 µm tida, neste trabalho, como padrão de calibração.

Num primeiro momento, apenas o braço mecânico é utilizado. Um mínimo de cinco pontos da superfície da esfera são apalpados, permitindo que as coordenadas de seu centro (X_{c_esfera} , Y_{c_esfera} , Z_{c_esfera}) em relação ao SCGB e seu raio (R_{esfera}) sejam calculados através de ajuste por Mínimos Quadrados. Sem alterar sua posição, a esfera é novamente medida, agora pelo sensor óptico, sendo armazenadas as coordenadas de diversos pontos de sua superfície em relação ao SCSO e, concomitantemente, a posição e a orientação do SCLA em relação ao SCGB (dados fornecidos pelo braço).

Aplicando a Equação 5.10 para um desses pontos, tem-se que:

$$X_{SB1} = a_{11}(b_{11}X_S + b_{12}Y_S + b_{13}Z_S - X_{oA}) + a_{12}(b_{21}X_S + b_{22}Y_S + b_{23}Z_S - Y_{oA}) + a_{13}(b_{31}X_S + b_{32}Y_S + b_{33}Z_S - Z_{oA}) - X_{oB} \quad (5.11)$$

$$Y_{SB1} = a_{21}(b_{11}X_S + b_{12}Y_S + b_{13}Z_S - X_{oA}) + a_{22}(b_{21}X_S + b_{22}Y_S + b_{23}Z_S - Y_{oA}) + a_{23}(b_{31}X_S + b_{32}Y_S + b_{33}Z_S - Z_{oA}) - Y_{oB} \quad (5.12)$$

$$Z_{SB1} = a_{31}(b_{11}X_S + b_{12}Y_S + b_{13}Z_S - X_{oA}) + a_{32}(b_{21}X_S + b_{22}Y_S + b_{23}Z_S - Y_{oA}) + a_{33}(b_{31}X_S + b_{32}Y_S + b_{33}Z_S - Z_{oA}) - Z_{oB} \quad (5.13)$$

Onde:

$$\hat{R} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

As coordenadas X_{SB1} , Y_{SB1} , Z_{SB1} acima representam um ponto da superfície da esfera em relação ao SCGB.

Sabendo que a esfera é a mesma e que sua posição espacial não sofreu alterações, pode-se estabelecer para o ponto em questão a seguinte função cujas variáveis independentes descrevem um modelo não-linear:

$$F_1(K) = \sqrt{(X_{SB1} - X_{C_esfera})^2 + (Y_{SB1} - Y_{C_esfera})^2 + (Z_{SB1} - Z_{C_esfera})^2} - R_{esfera} \quad (5.15)$$

Extrapolando para os outros pontos medidos com o sensor óptico, tem-se:

$$\begin{aligned} F_2(K) &= \sqrt{(X_{SB2} - X_{C_esfera})^2 + (Y_{SB2} - Y_{C_esfera})^2 + (Z_{SB2} - Z_{C_esfera})^2} - R_{esfera} \\ F_3(K) &= \sqrt{(X_{SB3} - X_{C_esfera})^2 + (Y_{SB3} - Y_{C_esfera})^2 + (Z_{SB3} - Z_{C_esfera})^2} - R_{esfera} \\ &\vdots \\ F_n(K) &= \sqrt{(X_{SBn} - X_{C_esfera})^2 + (Y_{SBn} - Y_{C_esfera})^2 + (Z_{SBn} - Z_{C_esfera})^2} - R_{esfera} \end{aligned} \quad (5.16)$$

$$K = [X_{oA}, Y_{oA}, Z_{oA}, \theta_X, \theta_Y, \theta_Z]$$

n - número de pontos medidos sobre a esfera pelo sensor óptico durante o procedimento de determinação dos parâmetros.

As funções $F(K)$ são denominadas funções erro sendo a soma dos seus quadrados dada por:

$$G = \sum_{j=1}^n F_j^2(K) \leq \varepsilon \quad (5.17)$$

Num caso ideal de medição, o valor da somatória acima é igual a zero, indicando que todos os pontos medidos com o sistema estão equidistantes do centro da esfera e suas distâncias são iguais ao raio.

Em situações reais, porém, esse valor é diferente de zero. Torna-se necessário determinar uma tolerância (valor máximo aceitável - ϵ), conforme equação 5.17. Logo, a primeira parcela da equação deve ser minimizada.

Resumindo a metodologia definida para a integração numérica, tem-se o seguinte fluxograma:

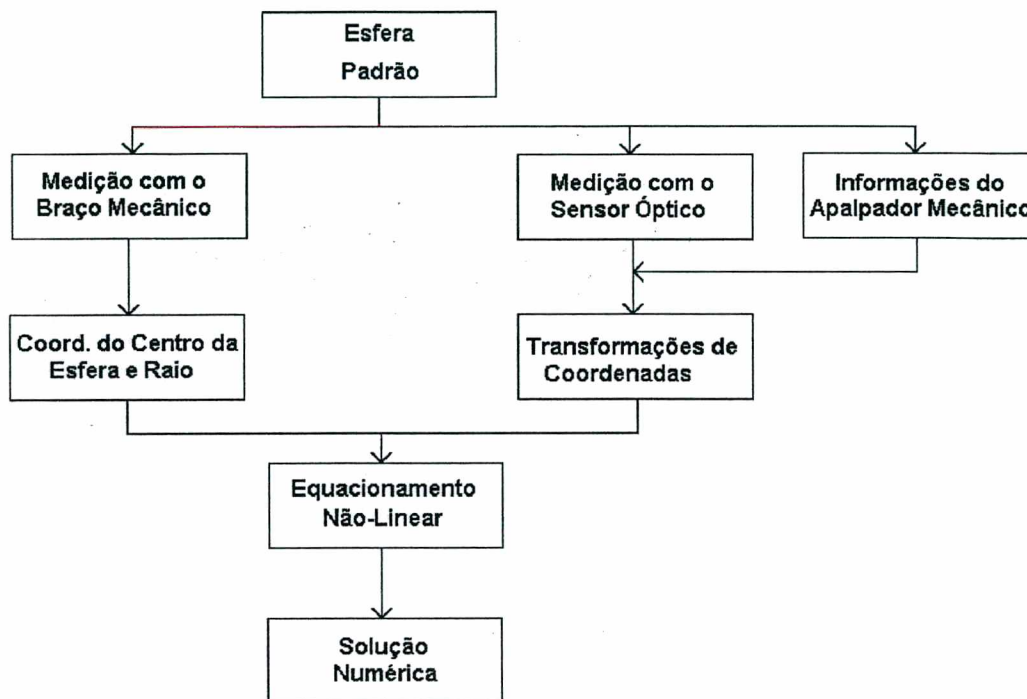


Figura 5.4 Fluxograma da metodologia empregada na integração numérica do sensor óptico ao braço de medição

5.3.3 Resolução da Função Não-Linear

Para solucionar o problema não-linear apresentado na equação 5.17, utiliza-se o Método Iterativo de Newton [63].

Nesse caso, faz-se uma estimativa inicial dos parâmetros - K_0 , calculando para cada ponto medido com o sensor, o respectivo valor de F (equações 5.15 e 5.16). Em seguida, obtém-se G (equação 5.17) e suas primeira e segunda derivadas:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 G}{\partial X_{oA}^2} & \frac{\partial^2 G}{\partial X_{oA} \partial Y_{oA}} & \frac{\partial^2 G}{\partial X_{oA} \partial Z_{oA}} & \frac{\partial^2 G}{\partial X_{oA} \partial \theta_X} & \frac{\partial^2 G}{\partial X_{oA} \partial \theta_Y} & \frac{\partial^2 G}{\partial X_{oA} \partial \theta_Z} \\ \frac{\partial^2 G}{\partial Y_{oA} \partial X_{oA}} & \frac{\partial^2 G}{\partial Y_{oA}^2} & \frac{\partial^2 G}{\partial Y_{oA} \partial Z_{oA}} & \frac{\partial^2 G}{\partial Y_{oA} \partial \theta_X} & \frac{\partial^2 G}{\partial Y_{oA} \partial \theta_Y} & \frac{\partial^2 G}{\partial Y_{oA} \partial \theta_Z} \\ \frac{\partial^2 G}{\partial Z_{oA} \partial X_{oA}} & \frac{\partial^2 G}{\partial Z_{oA} \partial Y_{oA}} & \frac{\partial^2 G}{\partial Z_{oA}^2} & \frac{\partial^2 G}{\partial Z_{oA} \partial \theta_X} & \frac{\partial^2 G}{\partial Z_{oA} \partial \theta_Y} & \frac{\partial^2 G}{\partial Z_{oA} \partial \theta_Z} \\ \frac{\partial^2 G}{\partial \theta_X \partial X_{oA}} & \frac{\partial^2 G}{\partial \theta_X \partial Y_{oA}} & \frac{\partial^2 G}{\partial \theta_X \partial Z_{oA}} & \frac{\partial^2 G}{\partial \theta_X^2} & \frac{\partial^2 G}{\partial \theta_X \partial \theta_Y} & \frac{\partial^2 G}{\partial \theta_X \partial \theta_Z} \\ \frac{\partial^2 G}{\partial \theta_Y \partial X_{oA}} & \frac{\partial^2 G}{\partial \theta_Y \partial Y_{oA}} & \frac{\partial^2 G}{\partial \theta_Y \partial Z_{oA}} & \frac{\partial^2 G}{\partial \theta_Y \partial \theta_X} & \frac{\partial^2 G}{\partial \theta_Y^2} & \frac{\partial^2 G}{\partial \theta_Y \partial \theta_Z} \\ \frac{\partial^2 G}{\partial \theta_Z \partial X_{oA}} & \frac{\partial^2 G}{\partial \theta_Z \partial Y_{oA}} & \frac{\partial^2 G}{\partial \theta_Z \partial Z_{oA}} & \frac{\partial^2 G}{\partial \theta_Z \partial \theta_X} & \frac{\partial^2 G}{\partial \theta_Z \partial \theta_Y} & \frac{\partial^2 G}{\partial \theta_Z^2} \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial G}{\partial X_{oA}} \\ \frac{\partial G}{\partial Y_{oA}} \\ \frac{\partial G}{\partial Z_{oA}} \\ \frac{\partial G}{\partial \theta_X} \\ \frac{\partial G}{\partial \theta_Y} \\ \frac{\partial G}{\partial \theta_Z} \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

Estabelecendo a fórmula recorrente:

$$K_{n+1} = \eta(K_n) \quad (5.20)$$

em que η é chamado de operador Newtoniano dado por:

$$\eta(K) = K - \psi \frac{G'(K)}{G''(K)} = K - \psi \frac{B}{A} \quad (5.21)$$

chega-se, através de minimização da equação 5.21, a um valor para ψ , que é utilizado para estimar novos parâmetros – K_1 .

Repetindo o procedimento descrito acima para K_1 , obtém-se um novo conjunto de parâmetros denominado K_2 , e assim sucessivamente, até que a condição da equação 5.17 seja satisfeita ou que um número máximo de iterações previamente definido seja atingido.

Porém, sempre que houver uma alteração na posição e/ou orientação do

sensor óptico em relação ao apalpador mecânico, novos parâmetros devem ser calculados, repetindo-se todo o procedimento.

5.4 Algoritmo para Medição de Forma 3-D Através do Sistema Integrado

O programa computacional que permite a determinação das coordenadas 3-D de um mensurando qualquer a partir do sistema braço-sensor foi desenvolvido em Visual Basic versão 5.1 [54].

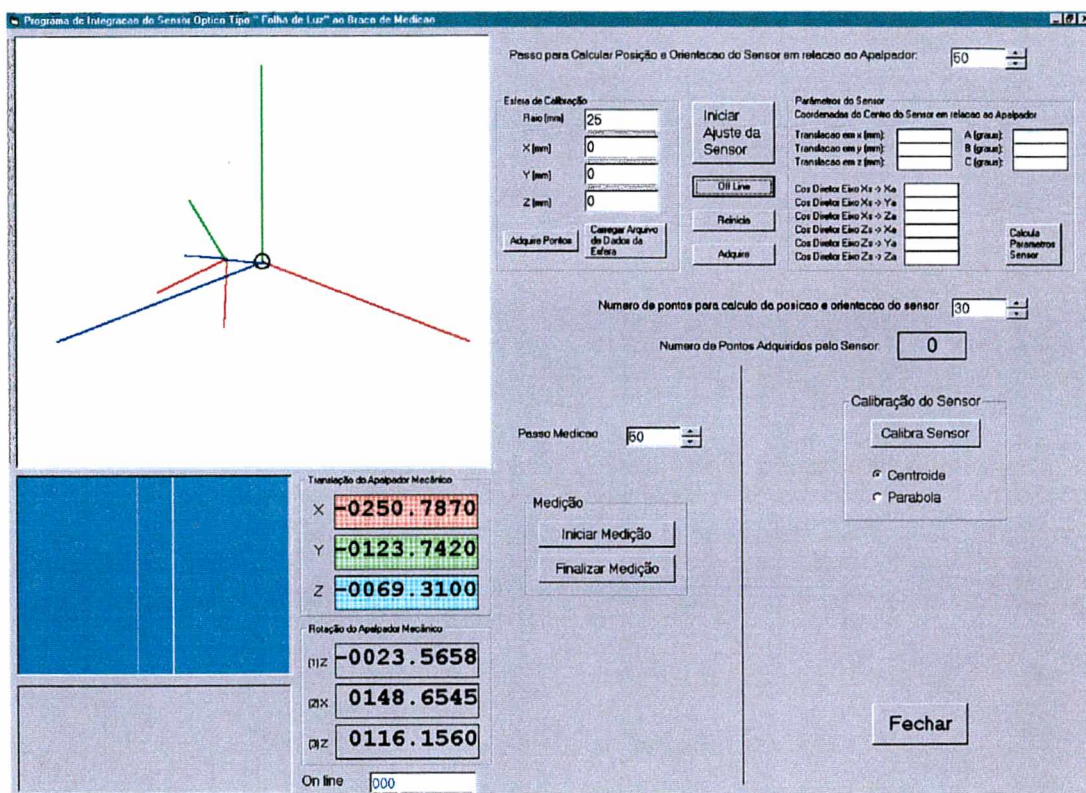


Figura 5.5 Tela de Apresentação do Programa de Integração Numérica e Medição de Forma 3-D.

Funcionamento do Programa:

1) Número de Pontos Adquiridos: mostra o número de pontos medidos pelo sensor e adquiridos pelo programa durante calibração dos parâmetros do SCSO;

- 2) Ângulos de Rotação do SCSO em relação ao SCLA: mostra os ângulos de rotação obtidos na calibração dos parâmetros do SCSO;
- 3) Cossenos Diretores do SCSO em relação ao SCLA: mostra os valores dos cossenos diretores do SCSO em relação ao SCLA com base nas informações dos ângulos de rotação;
- 4) Translação do SCSO em relação ao SCLA: mostra as coordenadas de translação obtidas na calibração dos parâmetros do SCSO;
- 5) Leituras da Posição e Orientação do SCLA em relação ao SCGB (on-line): informações provenientes do braço de medição através de porta serial;
- 6) Representação Gráfica dos Sistemas de Coordenadas Envolvidos na Integração: desenha os eixos cartesianos do três sistemas de coordenadas (SCSO, SCLA, SCGB) durante todo o período de funcionamento do programa e de forma *on-line*;
- 7) Tela de Visualização da Imagem do Sensor Óptico: transfere os dados contidos no *buffer* da placa de aquisição para o programa de medição, permitindo a visualização da imagem do sensor na tela do computador;
- 8) Comando "Adquire": permite que pontos da imagem do mensurando sejam determinados e suas coordenadas "x" e "z" devidamente calculadas.

5.4.1 Teste de Validação do Algoritmo de Cálculo dos Parâmetros de Posição e Orientação do Sensor Óptico em Relação ao Braço de Medição

O primeiro teste realizado no algoritmo de medição de forma 3-D buscou validar a rotina de integração numérica. Para tanto, foi feita uma simulação através do seguinte procedimento:

- 1) O SCGB foi posicionado em um lugar qualquer do espaço com auxílio do programa gerenciador do próprio braço de medição. Logo, este sistema de coordenadas ficou definido;
- 2) Estabeleceu-se uma esfera virtual, matematicamente perfeita, cujas coordenadas do centro e raio eram conhecidas. Essas informações foram repassadas para o algoritmo;
- 3) Os dados de transformação do SCSO para o SCLA também foram

definidos e embutidos no programa computacional. Sendo assim, sabia-se de antemão, quais os valores de translação e rotação entre o SCSO e o SCLA que o programa deveria fornecer ao final da rotina;

4) Implementou-se a comunicação do braço de medição com o programa computacional de forma que as informações relativas ao SCLA fossem realmente adquiridas;

5) Manipulando o braço, realizou-se uma medição virtual da esfera. Nesse caso, as coordenadas da superfície medidas pelo sensor óptico foram determinadas por relações matemáticas baseadas na verificação da intersecção do prolongamento do eixo “ z_s ”, cuja posição e orientação eram conhecidas, com a esfera virtual, também conhecida (vide figura 5.6);

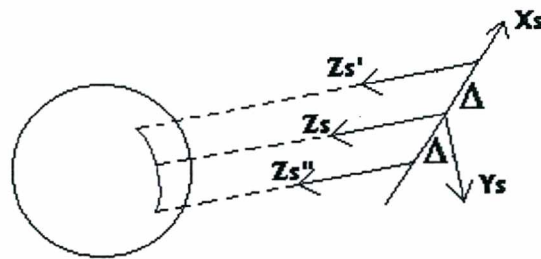


Figura 5.6 Determinação matemática das coordenadas medidas pelo sensor óptico durante medição virtual de uma esfera matematicamente perfeita.

6) Tendo as coordenadas de pontos medidos no SCSO e as informações do braço de medição, aplicaram-se as equações descritas na Seção 5.3.2 e na Seção 5.3.3, obtendo-se os valores finais dos parâmetros de calibração após algumas iterações.

Após diversos ensaios, verificou-se que os parâmetros calculados pelo programa foram idênticos aos estipulados e informados no passo 3 (Tabela 5.1).

Portanto, pode-se concluir que o algoritmo de calibração dos parâmetros do sensor óptico em relação ao apalpador mecânico é adequado, sendo válida sua aplicação na ausência de erros aleatórios.

Tabela 5.1 Resultados das calibrações de posição e orientação do SCSO em relação ao SCLA através de medição virtual de uma esfera matematicamente perfeita e de raio igual a 25 mm com sensor óptico ideal (sem incertezas).

Esfera 25 mm	X _{oA} (mm)	Y _{oA} (mm)	Z _{oA} (mm)	θ _x (°)	θ _y (°)	θ _z (°)
Medição 1	10,000	-5,000	-15,000	10,000	10,000	20,000
Medição 2	10,000	-5,000	-15,000	10,000	10,000	20,000
Medição 3	10,000	-5,000	-15,000	10,000	10,000	20,000
Medição 4	10,000	-5,000	-15,000	10,000	10,000	20,000
Medição 5	10,000	-5,000	-15,000	10,000	10,000	20,000
Valor Médio	10,000	-5,000	-15,000	10,000	10,000	20,000
Desvio Padrão	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Obs: Foram medidos 150 pontos sobre a superfície em cada medição; Os parâmetros embutidos no programa e tidos como valores verdadeiros convencionais nesse ensaio foram: X _{oA} = 10,000 mm Y _{oA} = -5,000 mm Z _{oA} = -15,000 mm θ _x = 10,000 ° θ _y = 10,000 ° θ _z = 20,000 °						

5.4.2 Estimativa da Incerteza na Calibração dos Parâmetros de Posição e Orientação do Sensor Óptico

Para estimar a incerteza na calibração dos parâmetros do sensor óptico, decidiu-se utilizar o mesmo procedimento descrito na Seção 5.4.1 considerando, porém, as incertezas padrão do sensor óptico estimadas no Capítulo 4.

Para cada par de coordenadas (X_S, Z_S), foram embutidos erros aleatórios de tal sorte que:

$$\begin{aligned}\tilde{X}_S &= X_S + \sigma_{X_S} \sqrt{-2\ln(\text{número_aleatório})} \cos(2\pi \cdot \text{número_aleatório}) \\ \tilde{Z}_S &= Z_S + \sigma_{Z_S} \sqrt{-2\ln(\text{número_aleatório})} \cos(2\pi \cdot \text{número_aleatório})\end{aligned}\quad (5.19)$$

Para infinitos números aleatórios – na (0 ≤ na ≤ 1), essas equações tendem à uma distribuição do tipo normal com média em (X_S, Z_S) e desvio padrão igual a incerteza padrão de cada coordenada (±0,3 mm e ±0,1 mm, respectivamente).

Refazendo a medição virtual da esfera nessas condições, obtiveram-se os

resultados abaixo:

Tabela 5.2 Resultados das calibrações de posição e orientação do SCSO em relação ao SCLA através de medição virtual de uma esfera matematicamente perfeita e de raio igual a 25 mm com sensor óptico não ideal (com incertezas).

Esfera 25 mm	X_{oA} (mm)	Y_{oA} (mm)	Z_{oA} (mm)	θ_x (°)	θ_y (°)	θ_z (°)
Medição 1	9,484	-4,880	-15,609	10,190	10,334	20,102
Medição 2	10,752	-5,698	-14,293	9,629	9,551	20,153
Medição 3	10,090	-5,397	-14,500	9,729	9,986	20,332
Medição 4	10,149	-4,963	-14,871	10,032	10,018	20,120
Medição 5	9,926	-5,260	-15,517	9,903	9,844	20,191
Valor Médio	10,080	-5,240	-14,958	9,897	9,947	20,180
Desvio Padrão	0,457	0,332	0,591	0,226	0,284	0,092
Obs: Foram medidos 150 pontos sobre a superfície em cada medição; Os parâmetros embutidos no programa e tidos como valores verdadeiros convencionais nesse ensaio foram: $X_{oA} = 10,000$ mm $Y_{oA} = -5,000$ mm $Z_{oA} = -15,000$ mm $\theta_x = 10,000$ ° $\theta_y = 10,000$ ° $\theta_z = 20,000$ °						

Observa-se que as incertezas das coordenadas do sensor influenciam consideravelmente a determinação dos parâmetros de posição e orientação do SCSO, tanto nas coordenadas de translação quanto nos ângulos de rotação.

As incertezas padrão estimadas para cada variável são:

$$uX_{oA} = \pm 0,457 \text{ mm}$$

$$uY_{oA} = \pm 0,332 \text{ mm}$$

$$uZ_{oA} = \pm 0,591 \text{ mm}$$

$$u\theta_x = \pm 0,226^\circ$$

$$u\theta_y = \pm 0,284^\circ$$

$$u\theta_z = \pm 0,092^\circ$$

Conforme será apresentado no item 6.2.2, essas variações podem acarretar em resultados de medições distintos, caracterizando-se como importantes fontes de incerteza do sistema integrado.

Capítulo 6

Análise Metrológica do Sistema Integrado

6.1 Fontes de Incerteza

O processo de medição de um objeto qualquer através do sistema integrado pode ser dividido em três etapas, conforme apresentado na figura 6.1.

A primeira etapa refere-se à integração mecânica dos equipamentos.

A segunda, trata da integração numérica. Nota-se que a incerteza na determinação da posição e orientação do sensor óptico em relação ao apalpador mecânico é função dos erros de forma da esfera padrão e das incertezas do sensor óptico e do braço medição, podendo a componente aleatória dessa incerteza ser estimada através de sua repetitividade.

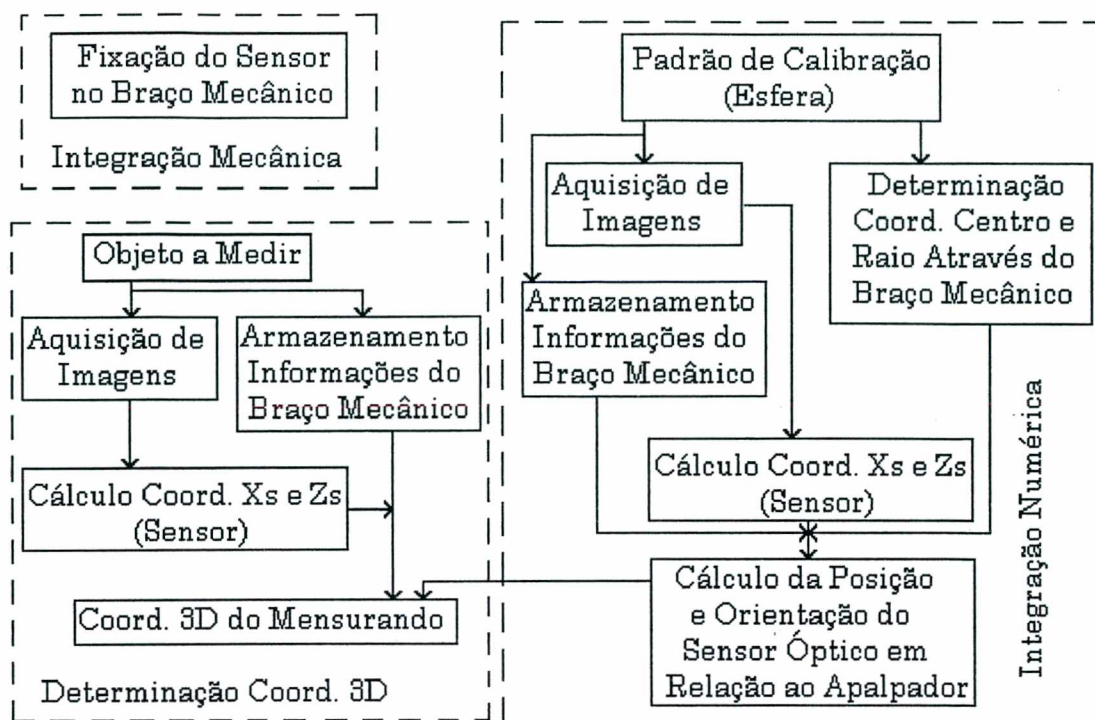


Figura 6.1 Diagrama do Processo de Medição com o Sistema Integrado Braço / Sensor

Por fim, tem-se a etapa onde as coordenadas da superfície do mensurando são calculadas através da combinação dos dados da etapa anterior com novas informações do sensor óptico e do braço de medição. Novamente, suas incertezas dependem das incertezas do sensor óptico e do braço de medição, além da determinação dos parâmetros de calibração do sensor óptico.

Essas três fontes são consideradas fontes de incerteza primárias do sistema de medição integrado, tal como apresentado no diagrama da figura 6.2.

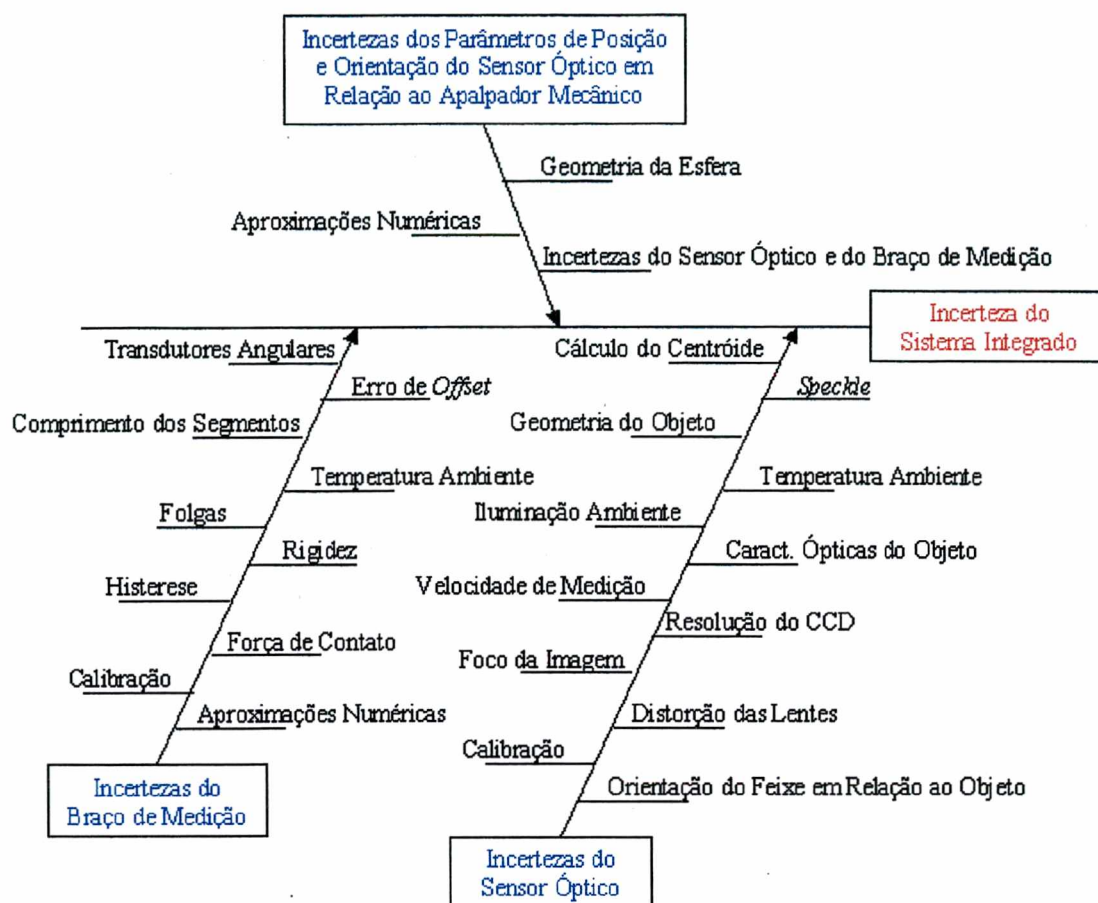


Figura 6.2 Diagrama do Tipo “Espinha de Peixe” contendo as Fontes de Incerteza do Sistema de Medição Integrado

6.2 Estimativa da Incerteza do Sistema de Medição Integrado

6.2.1 Medições de Superfícies Geométricas Regulares

Com o intuito de estimar a incerteza do sistema integrado, alguns elementos geométricos conhecidos foram medidos em diversas posições espaciais.

Dentre as geometrias medidas, escolheram-se o plano e a esfera em virtude de sua fácil caracterização.

Plano

A primeira superfície medida com o sistema integrado foi o plano. O parâmetro geométrico adotado para caracterizá-lo foi a sua planeza.

A Tabela 6.1 mostra os resultados obtidos em 5 medições independentes do plano em uma posição “A” qualquer do volume de trabalho do braço. A partir dos pontos medidos sobre sua superfície, utilizou-se o método de ajuste por Mínimos Quadrados para se determinar os coeficientes da equação do plano médio ($Ax + By + Cz = 1$).

Tabela 6.1 Resultados das medições do plano na posição espacial “A”

Plano	A	B	C	Desvio Padrão Residual	Erro Residual Mínimo	Erro Residual Máximo	Número de Pontos
Medição 1	-3,46E-03	-1,17E-03	-9,40E-02	0,427	-1,679	1,105	500
Medição 2	-3,63E-03	-1,49E-03	-9,01E-02	0,482	-0,967	1,073	380
Medição 3	-3,17E-03	-1,40E-03	-9,55E-02	0,439	-0,984	1,514	560
Medição 4	-3,16E-03	-1,35E-03	-9,21E-02	0,426	-1,383	1,174	580
Medição 5	-3,24E-03	-1,30E-03	-9,09E-02	0,236	-0,642	0,606	540
Valor Médio	-3,33E-03	-1,34E-03	-9,25E-02	0,402	-1,131	1,094	-----
Desvio Padrão	2,07E-04	1,17E-04	2,22E-03	-----	-----	-----	-----
Repetit. (95%)	$\pm 5,74E-04$	$\pm 3,24E-04$	$\pm 6,16E-03$	-----	-----	-----	-----

O erro de forma do plano em cada medição é estimado através do desvio padrão das diferenças entre os pontos medidos e a equação ajustada para o plano médio (desvio padrão residual), sendo calculados ainda os erros residuais mínimo e máximo.

À exceção da quinta medição, os valores obtidos para o desvio padrão residual ficaram em torno de 0,450 mm.

Adotando o mesmo procedimento para uma posição “B” do plano no espaço e mantendo inalteradas as características operacionais do sistema integrado, obtiveram-se os seguintes resultados (Tabela 6.2).

Tabela 6.2 Resultados das medições do plano na posição espacial “B”

Plano	A	B	C	Desvio Padrão Residual	Erro Residual Mínimo	Erro Residual Máximo	Número de Pontos
Medição 1	6,12E-04	3,45E-04	-4,86E-06	0,813	-2,077	1,794	293
Medição 2	6,15E-04	3,53E-04	-4,75E-06	0,979	-2,303	2,361	480
Medição 3	6,14E-04	3,49E-04	-1,89E-06	0,648	-2,244	2,124	820
Medição 4	6,15E-04	3,51E-04	-5,54E-06	0,392	-1,202	0,828	268
Medição 5	6,18E-04	3,62E-04	-8,92E-06	0,416	-1,012	1,590	559
Valor Médio	6,15E-04	3,52E-04	-5,19E-06	0,650	-1,768	1,739	-----
Desvio Padrão	2,26E-06	6,44E-06	2,51E-06	-----	-----	-----	-----
Repetit. (95%)	± 6,28E-06	± 1,79E-05	± 6,97E-06	-----	-----	-----	-----

Nessa situação, o desvio padrão residual variou entre 0,416 mm e 0,979 mm, sendo a média igual a 0,650 mm. Nota-se que este valor é superior àquele encontrado para o plano na posição “A”.

A Tabela 6.3 mostra os valores obtidos na medição do mesmo plano em uma terceira posição espacial (posição “C”).

Tabela 6.3 Resultados das medições do plano na posição espacial “C”

Plano	A	B	C	Desvio Padrão Residual	Erro Residual Mínimo	Erro Residual Máximo	Número de Pontos
Medição 1	-7,02E-04	-1,60E-03	-1,23E-05	1,167	-2,124	3,136	477
Medição 2	-6,98E-04	-1,60E-03	-1,83E-05	1,276	-3,013	2,383	380
Medição 3	-6,89E-04	-1,60E-03	-1,71E-05	1,329	-2,166	3,138	495
Medição 4	-7,01E-04	-1,60E-03	-6,53E-06	0,976	-2,215	3,157	660
Medição 5	-7,03E-04	-1,60E-03	-6,65E-06	1,376	-3,857	2,656	520
Valor Médio	-6,99E-04	-1,60E-03	-1,22E-05	1,225	-2,675	2,894	-----
Desvio Padrão	5,56E-06	3,78E-06	5,59E-06	-----	-----	-----	-----
Repetit. (95%)	± 1,54E-05	± 1,05E-05	± 1,55E-05	-----	-----	-----	-----

Pela tabela acima, nota-se que a variação do desvio padrão residual entre cada medição não foi tão acentuado como no caso anterior.

Contudo, o valor médio para esse parâmetro foi de 1,225 mm, superando a posição “A” em 300% e a posição “B” em 188%.

Esferas

Nesta parte do trabalho, duas esferas de rolamento foram medidas: uma de raio igual a 25,043 mm e outra, igual a 20,044 mm (vide Tabela 6.12). O parâmetro geométrico utilizado para caracterizá-las foi o raio.

Ambas foram presas a uma barra metálica, tal como mostra a figura 6.3.

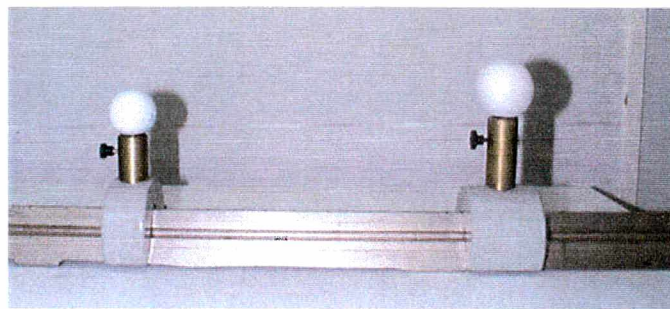


Figura 6.3 Fotografia das esferas de 20 mm e 25 mm presas sobre uma barra metálica.

Essa barra foi então posicionada em 5 diferentes regiões do volume de trabalho do sistema integrado. Para cada posição, foram realizadas 5 medições de cada esfera.

A Tabela 6.4 mostra os resultados obtidos para a esfera de 20 mm na posição “D”. Como na medição do plano, foi utilizado o método de ajuste por Mínimos Quadrados para se determinar a equação da esfera média.

Novamente, o desvio padrão e os erros residuais mínimo e máximo foram calculados levando em consideração as diferenças entre todos os pontos medidos e a equação ajustada para a esfera média.

Tabela 6.4 Resultados das medições da esfera de 20 mm na posição espacial “D”

Esfera 20 mm	Raio Medido	Desvio Padrão Residual	Erro Residual Mínimo	Erro Residual Máximo	Número de Pontos
Medição 1	19,593	0,530	-0,955	1,309	81
Medição 2	19,703	0,361	-0,914	0,849	81
Medição 3	19,667	0,580	-1,234	1,309	73
Medição 4	19,799	0,662	-1,822	1,289	84
Medição 5	19,931	0,537	-1,244	1,112	94
Valor Médio	19,739	0,534	-1,822	1,309	-----
Desvio Padrão	0,130	-----	-----	-----	-----
Repetit. (95%)	± 0,362	-----	-----	-----	-----

Nota-se que o desvio padrão residual da esfera ficou, em média, em 0,534 mm. Além disso, o raio médio obtido foi de 19,739 mm com desvio padrão de 0,130 mm.

Tabela 6.5 Resultados das medições da esfera de 25 mm na posição espacial “D”

Esfera 25 mm	Raio Medido	Desvio Padrão Residual	Erro Residual Mínimo	Erro Residual Máximo	Número de Pontos
Medição 1	24,868	0,695	-1,283	2,325	88
Medição 2	24,911	0,569	-1,464	1,581	135
Medição 3	24,563	0,958	-3,547	1,871	145
Medição 4	24,512	0,783	-1,734	1,794	111
Medição 5	24,902	0,613	-1,615	1,759	112
Valor Médio	24,751	0,724	-3,547	2,325	-----
Desvio Padrão	0,197	-----	-----	-----	-----
Repetit. (95%)	± 0,546	-----	-----	-----	-----

Para a esfera de 25 mm, o desvio padrão residual ficou em 0,724 mm, enquanto o raio médio e seu desvio padrão foram iguais a 24,751 mm e 0,197 mm, respectivamente.

As duas esferas medidas na posição “D” apresentaram raios médios inferiores aos seus valores nominais: diferença, em módulo, de 0,261 mm para a esfera de 20 mm e de 0,249 mm para a esfera de 25 mm. Com relação ao

desvios padrão residuais, os valores médios das duas medições ficaram relativamente próximos.

Para a posição “E” das esferas, tem-se os resultados da tabela 6.6.

Nesse caso, observa-se que o valor do desvio padrão residual obtido foi de 1,097 mm, superando em duas vezes o valor obtido para a mesma esfera na posição “D”.

Por outro lado, o raio médio sofreu uma redução no seu valor se comparado com o resultado da posição “D”. A diferença entre o valor obtido e o valor nominal (20 mm) agora é de 1,115 mm (em módulo).

Tabela 6.6 Resultados das medições da esfera de 20 mm na posição espacial “E”

Esfera 20 mm	Raio Medido	Desvio Padrão Residual	Erro Residual Mínimo	Erro Residual Máximo	Número de Pontos
Medição 1	18,753	1,179	-3,662	2,794	88
Medição 2	19,106	1,328	-4,135	3,359	108
Medição 3	19,123	0,687	-1,241	1,655	95
Medição 4	18,793	1,305	-3,097	3,940	133
Medição 5	18,653	0,985	-2,288	2,292	91
Valor Médio	18,885	1,097	-4,135	3,940	-----
Desvio Padrão	0,215	-----	-----	-----	-----
Repetit. (95%)	± 0,598	-----	-----	-----	-----

Comportamento semelhante foi constatado para a esfera de 25 mm, conforme Tabela 6.7. Novamente, o desvio padrão residual superou o resultado da posição “D” em 1,5 vezes enquanto o raio médio é 0,847 mm menor que o valor nominal da esfera (25 mm).

Tabela 6.7 Resultados das medições da esfera de 25 mm na posição espacial “E”

Esfera 25 mm	Raio Medido	Desvio Padrão Residual	Erro Residual Mínimo	Erro Residual Máximo	Número de Pontos
Medição 1	23,987	1,101	-3,300	2,474	103
Medição 2	24,654	1,404	-3,221	4,482	137
Medição 3	23,707	1,166	-2,431	2,952	123
Medição 4	24,031	0,991	-1,918	2,470	125
Medição 5	24,388	0,988	-2,499	2,390	126
Valor Médio	24,153	1,130	-3,300	4,482	-----
Desvio Padrão	0,370	-----	-----	-----	-----
Repetit. (95%)	± 1,027	-----	-----	-----	-----

Os resultados obtidos nas medições “F”, “G” e “H” são apresentados nas Tabelas 6.8 e 6.9 para as esferas de 20 mm e 25 mm, respectivamente.

Para a esfera menor, percebe-se que o raio médio calculado através do ajuste ficou entre 19,575 mm e 19,912 mm, sendo a maior diferença em relação ao valor nominal igual a 0,425 mm. Em se tratando do desvio padrão residual, o maior valor médio obtido foi de 1,555 mm (posição “G”).

Tabela 6.8 Resultados das medições da esfera de 20 mm nas posições espaciais “F”, “G” e “H”.

Esfera 20 mm	Posição "F"		Posição "G"		Posição "H"	
	Raio Medido	Desvio Padrão Residual	Raio Medido	Desvio Padrão Residual	Raio Medido	Desvio Padrão Residual
Medição 1	20,240	1,203	19,883	1,705	19,671	0,698
Medição 2	19,602	1,194	20,358	1,735	19,771	1,083
Medição 3	19,231	1,237	19,573	1,103	19,807	0,983
Medição 4	18,944	1,482	20,419	1,879	19,587	0,595
Medição 5	19,855	1,096	19,328	1,355	19,714	0,874
Valor Médio	19,575	1,242	19,912	1,555	19,710	0,846
Desvio Padrão	0,509	-----	0,478	-----	0,087	-----
Repetit. (95%)	± 1,413	-----	± 1,326	-----	± 0,240	-----

Tabela 6.9 Resultados das medições da esfera de 25 mm nas posições espaciais “F”, “G” e “H”.

Esfera 25 mm	Posição "F"		Posição "G"		Posição "H"	
	Raio Medido	Desvio Padrão Residual	Raio Medido	Desvio Padrão Residual	Raio Medido	Desvio Padrão Residual
Medição 1	25,036	1,456	24,747	1,018	25,148	0,340
Medição 2	25,316	1,294	24,963	1,048	24,814	0,646
Medição 3	25,602	1,507	24,337	1,162	24,527	0,595
Medição 4	24,896	1,616	24,981	1,294	24,462	0,565
Medição 5	25,072	1,252	25,426	1,152	24,472	0,550
Valor Médio	25,185	1,425	24,891	1,135	24,685	0,539
Desvio Padrão	0,278	-----	0,396	-----	0,296	-----
Repetit. (95%)	± 0,773	-----	± 1,099	-----	± 0,823	-----

A esfera de raio 25 mm teve o seu raio médio variando entre 24,685 mm e 25,185 mm. O desvio padrão residual nesse caso atingiu o patamar de 1,425 mm.

6.2.2 Análise dos Resultados da Medição de Superfícies Regulares

Nas medições do plano e das esferas, os valores máximos do desvio padrão residual médio (dispersão dos pontos) foram similares:

- Plano: 1,225 mm
- Esfera de 20 mm: 1,555 mm
- Esfera de 25 mm: 1,425 mm

Dependendo do que se deseja medir, tais valores podem ser considerados elevados, inviabilizando a medição.

Além disso, a média dos raios ajustados para as esferas em diferentes posições espaciais apresentou uma certa variação, conforme mostra a tabela 6.10 abaixo.

Tabela 6.10 Média dos raios ajustados para as esferas em cada posição espacial.

	Esfera 20 mm	Esfera 25 mm
Posição 1	(19,74 ± 0,13) mm	(24,75 ± 0,20) mm
Posição 2	(18,89 ± 0,22) mm	(24,15 ± 0,37) mm
Posição 3	(19,56 ± 0,51) mm	(25,19 ± 0,28) mm
Posição 4	(19,91 ± 0,48) mm	(24,89 ± 0,40) mm
Posição 5	(19,71 ± 0,09) mm	(24,69 ± 0,30) mm

No intuito de explicar esses resultados, fez-se, primeiramente, uma análise da influência das incertezas do sensor óptico sobre o desempenho do sistema integrado. Para tanto, a medição de uma esfera matematicamente perfeita e de raio igual a 25 mm foi novamente simulada.

Nessa simulação, os parâmetros de posição e orientação do SCSO em relação ao SCLA foram pré-fixados e as informações relativas às coordenadas “x_s” e “z_s” do sensor foram obtidas tal como descrito na Seção 5.4.1, acrescidas de suas incertezas padrão estimadas na calibração do sensor óptico: ± 0,3 mm na direção do eixo “z_s” (profundidade) do sensor e ± 0,1 mm para a direção “x_s” (largura).

Foram realizadas 5 medições da esfera virtual em 3 posições espaciais distintas, chegando aos seguintes resultados:

Tabela 6.11 Resultados das medições virtuais da esfera de 25 mm em três posições espaciais - “I”, “J” e “K” – considerando a incerteza do sensor óptico.

Esfera 25 mm Virtual	Posição "I"		Posição "J"		Posição "K"	
	Raio Medido	Desvio Padrão Residual	Raio Medido	Desvio Padrão Residual	Raio Medido	Desvio Padrão Residual
Medição 1	24,801	0,299	24,972	0,285	25,098	0,315
Medição 2	25,071	0,191	24,657	0,218	24,714	0,275
Medição 3	24,961	0,228	24,946	0,273	25,177	0,196
Medição 4	25,057	0,192	24,621	0,245	25,008	0,205
Medição 5	25,145	0,277	24,867	0,185	24,603	0,231
Valor Médio	25,007	0,237	24,813	0,241	24,920	0,244
Desvio Padrão	0,132	-----	0,164	-----	0,249	-----
Repetit. (95%)	± 0,367	-----	± 0,455	-----	± 0,691	-----

A influência do sensor óptico sobre a medição da esfera virtual é nítida. O desvio padrão residual foi superior a 0,200 mm nas três condições, podendo-se observar ainda variações na média dos raios ajustados em função da posição espacial do mensurando:

- Posição “I”: $(25,01 \pm 0,13)$ mm;
- Posição “J”: $(24,81 \pm 0,16)$ mm;
- Posição “K”: $(24,92 \pm 0,25)$ mm.

Em seguida, fez-se um estudo da influência das incertezas dos parâmetros de posição e orientação do SCSO sobre os resultados da medição com o sistema integrado.

Sabendo que os parâmetros de translação do SCSO em relação ao SCLA são da ordem de:

- Translação “ X_{oA} ”: 106 mm
- Translação “ Y_{oA} ”: 67 mm
- Translação “ Z_{oA} ”: 23 mm

pode-se calcular a distância entre a origem do SCSO e a origem do SCLA, tal como mostra a figura abaixo.

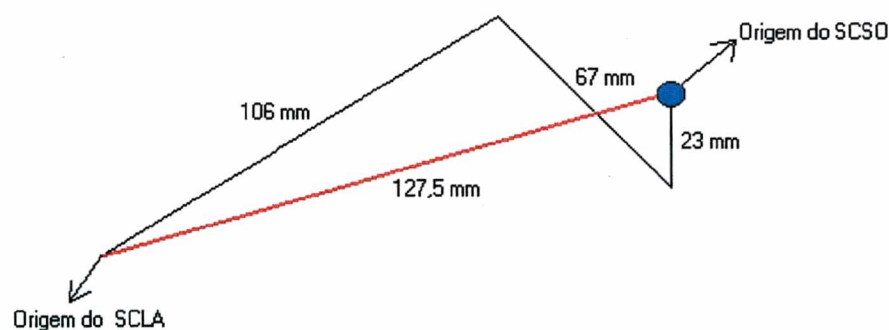


Figura 6.4 Modelo utilizado para estimar a influência das incertezas dos parâmetros de translação nos resultados da medição com o sistema integrado.

Considerando as incertezas padrão dos parâmetros de translação estimadas na seção 5.4.2:

- $uX_{oA} = \pm 0,457 \text{ mm}$
- $uY_{oA} = \pm 0,332 \text{ mm}$
- $uZ_{oA} = \pm 0,591 \text{ mm}$

tem-se:

$$u_{transl.} = \sqrt{uX_{oA}^2 + uY_{oA}^2 + uZ_{oA}^2} = \pm 0,818 \text{ mm} \quad (6.1)$$

Essa equação define uma esfera (região em azul da figura 6.4) onde as coordenadas do centro do SCSO podem estar contidas com uma probabilidade de, aproximadamente, 68%.

Por outro lado, sabendo que as incertezas padrão dos ângulos de orientação do SCSO em relação ao SCLA são iguais a:

- $u\theta_X = \pm 0,226^\circ$
- $u\theta_Y = \pm 0,284^\circ$
- $u\theta_Z = \pm 0,092^\circ$

estima-se suas influências no resultado final da medição através das seguintes equações:

$$u_{rotação_direçãoXs} = \pm 127,5 * \sin(|u\theta_X|) = \pm 0,503 \text{ mm} \quad (6.2)$$

$$u_{rotação_direçãoYs} = \pm 127,5 * \sin(|u\theta_Y|) = \pm 0,632 \text{ mm} \quad (6.3)$$

$$u_{rotação_direçãoZs} = \pm 127,5 * \sin(|u\theta_Z|) = \pm 0,205 \text{ mm} \quad (6.4)$$

$$u_{rotação} = \sqrt{(u_{rotação_direçãoXs})^2 + (u_{rotação_direçãoYs})^2 + (u_{rotação_direçãoZs})^2} = \pm 0,833 \text{ mm} \quad (6.5)$$

A equação 6.2 indica uma variação na determinação da origem do SCSO tal como mostra a figura 6.5. A mesma consideração é feita para os casos da equações 6.3 e 6.4.

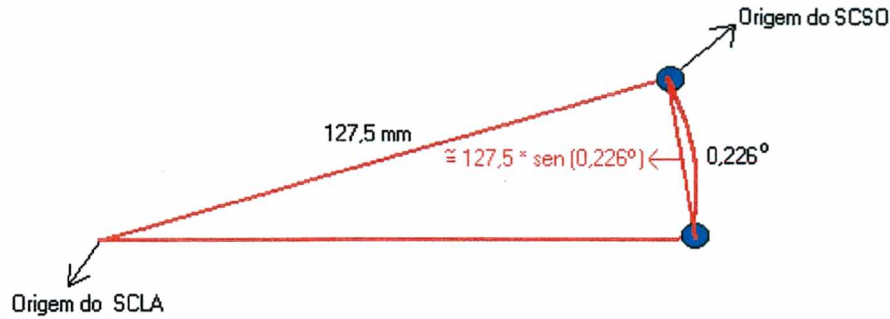


Figura 6.5 Modelo utilizado para estimar a influência da incerteza do parâmetro de rotação θ_x nos resultados da medição com o sistema integrado.

Combinando então as equações 6.1 e 6.5, tem-se:

$$u_{\text{parâmetros}} = \sqrt{u_{\text{transl.}}^2 + u_{\text{rotação}}^2} = \pm 1,167 \text{ mm} \quad (6.6)$$

Como os parâmetros de posição e orientação do sensor óptico (SCSO) em relação ao apalpador mecânico (SCLA), uma vez determinados, permanecem fixos durante toda a medição, por segurança, as influências das incertezas padrão do sensor óptico e dos parâmetros de translação e rotação sobre o resultado da medição são consideradas estatisticamente dependentes, ou seja, com fator de correlação igual a 1. Portanto, a soma dessas influências é dada por:

$$u_{\text{influências}} = u_{\text{sensor óptico}} + u_{\text{parâmetros}} = \pm(0,200 + 1,167) \text{ mm} = \pm 1,367 \text{ mm} \quad (6.7)$$

O valor da incerteza padrão estimada pela equação 6.7 é relativamente próxima daquela obtida na medição real da esfera de 25 mm ($\pm 1,425$ mm), ficando bem caracterizada a incerteza de medição do sistema integrado.

A diferença entre os valores real e simulado pode ser consequência de outras fontes de incerteza, tais como erros de processamento numérico, acabamento e curvatura da superfície esférica, iluminação externa e variação da temperatura ambiente, fontes essas não foram consideradas nos cálculos acima.

6.2.3 Resultados Finais – Incertezas Padrão e Expandida

Tanto o plano como as esferas foram medidas por uma Máquina de Medir por Coordenadas Convencional pertencente à Fundação CERTI e também pelo braço de medição. Os resultados são tabelados, permitindo uma comparação.

Tabela 6.12 Comparação dos Resultados da Medição do Plano e Esferas para a MMCC, Braço de Medição e Sistema Integrado.

Sistema de Medição	Plano		Esfera 20 mm			Esfera 25 mm		
	u_p (mm)	$U_{95\%}$ (mm)	Raio (mm)	u_p (mm)	$U_{95\%}$ (mm)	Raio (mm)	u_p (mm)	$U_{95\%}$ (mm)
MMC Convencional	$\pm 0,035$	$\pm 0,070$	20,044	$\pm 0,004$	$\pm 0,008$	25,043	$\pm 0,010$	$\pm 0,020$
Braço de Medição	$\pm 0,137$	$\pm 0,274$	20,053	$\pm 0,032$	$\pm 0,064$	25,004	$\pm 0,048$	$\pm 0,096$
Sistema Integrado	$\pm 1,225$	$\pm 2,450$	19,564	$\pm 1,555$	$\pm 3,110$	24,733	$\pm 1,425$	$\pm 2,850$

Considerando a combinação das características das formas medidas e dos sistemas de medição empregados, a medição com a Máquina de Medir por Coordenadas Convencional apresenta a menor incerteza, seja na medição do plano ($\pm 0,070$ mm), seja na medição das esferas ($\pm 0,008$ mm / $\pm 0,020$ mm), seguida pelo braço de medição ($\pm 0,274$ mm para o plano e $\pm 0,064$ mm / $\pm 0,096$ mm para as esferas). O sistema de medição integrado, como esperado, apresenta a maior incerteza: $\pm 1,2$ mm (plano), $\pm 1,6$ mm (esfera 20 mm), $\pm 1,4$ mm (esfera 25 mm).

6.3 Medição de Superfícies Livres

Muito embora o sistema integrado apresente uma incerteza maior que a MMC convencional e a MMC portátil, é possível utilizá-lo em medições de formas livres, dependendo da incerteza de medição desejada. Neste trabalho, duas peças desta natureza foram medidas com o conjunto braço-sensor: uma peça de massa química (Durepox) moldada a mão e uma manequim.



Figura 6.6 Fotografia de uma peça de massa química e gráfico 3-D contendo coordenadas de sua superfície medidas com o sistema integrado.

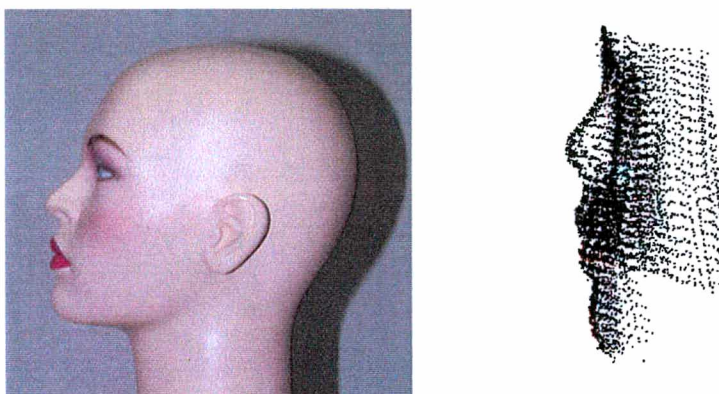


Figura 6.7 Fotografia de uma manequim e gráfico 3-D contendo coordenadas de sua superfície medidas com o sistema integrado.

6.4 Medição Dimensional – Distância entre Centros de Esferas

Além da medição geométrica, o sistema integrado pode ser aplicado em medições dimensionais. Para avaliar o desempenho do sistema integrado nessa

aplicação, fez-se a medição da distância entre centro de duas esferas sendo suas coordenadas de centro determinadas através do ajuste de Mínimos Quadrados dos pontos medidos sobre a superfície de cada mensurando.

As esferas foram medidas em três posições espaciais distintas com o braço de medição e com o sistema integrado. A tabela 6.13 mostra os resultados alcançados.

Tabela 6.13 Comparação dos resultados da medição de distâncias entre centro de esferas com o Braço de Medição e com o Sistema Integrado.

Braço de Medição	Posições		
	"L"	"M"	"N"
Valor Médio (mm)	713,634	713,052	713,701
Desvio Padrão (mm)	0,038	0,034	0,068
Repetitividade (mm)	± 0,079	± 0,069	± 0,140
Sistema Integrado	Posições		
	"L"	"M"	"N"
Valor Médio (mm)	713,494	712,791	713,397
Desvio Padrão (mm)	0,408	0,421	0,531
Repetitividade (mm)	± 0,843	± 0,869	± 1,097

Os valores médios de distância obtidos com o braço de medição foram maiores que aqueles obtidos com o sistema integrado. Considerando as medições do braço como sendo valores verdadeiros convencionais, pode-se constatar tendências iguais a - 0,140 mm (posição 1), -0,261 mm (posição 2) e -0,304 mm (posição 3). Além disso, as incertezas expandidas do sistema integrado ficaram em torno de 10 vezes maiores que as incertezas do braço de medição.

Observa-se ainda que as incertezas das medições de distância com o sistema integrado foram menores que as incertezas das medições de forma. Essa diminuição poderia ser explicada em função da provável dependência dos erros do sistema integrado com a orientação do braço mecânico. Como as duas esferas são digitalizadas pelo sistema com o braço quase que na mesma orientação, a parcela do erro dependente da orientação está presente em ambas as posições com aproximadamente a mesma intensidade. A diferença entre ambas é assim reduzida.

Capítulo 7

Conclusões

Este trabalho esteve focado na integração de um sensor óptico tipo “Folha de Luz” em um Braço de Medição (Máquina de Medir por Coordenadas Portátil), possibilitando a medição de superfícies livres e o desenvolvimento de uma tecnologia capaz de ser empregada em outras aplicações de mesma natureza.

O interesse específico desta tecnologia está direcionada ao projeto ROBOTURB – Sistema Automatizado de Recuperação de Turbinas Hidráulicas de Grande Porte / PADCT III – do qual este trabalho faz parte. Este projeto, desenvolvido em parceria pela UFSC, COPEL e governo federal (MCT/PADCT) e com custo inicial estimado em R\$ 1.500.000,00, prevê a construção de um robô articulado de seis graus de liberdade capaz de realizar *in situ* a recuperação de superfícies de rotores de turbinas hidráulicas de grande porte erodidas por cavitação. A geometria das regiões de cavitação serão medidas por um sensor óptico tipo “Folha de Luz” semelhante ao utilizado neste trabalho, que estará acoplado ao próprio robô. Estas informações serão usadas para guiar o preenchimento com solda das regiões danificadas.

Em função do robô ainda não estar disponível durante o desenvolvimento deste trabalho, a tecnologia de medição foi desenvolvida substituindo o robô por um braço de medição portátil. Do ponto de vista de medição, embora operado manualmente, o braço de medição cumpre o papel do

robô ao informar continuamente a posição e orientação espacial do sensor de folha de luz. Esta tecnologia será posteriormente transposta para o robô.

Para viabilizar seu sucesso, o trabalho foi estruturado em cinco etapas:

1. Estudo das principais técnicas de medição de superfícies livres utilizadas pelas indústrias e centros de pesquisa;
2. Análise do princípio de funcionamento, configurações, forma de calibração e principais fontes de incerteza de um sensor óptico tipo “Folha de Luz”;
3. Análise do princípio de funcionamento, configurações, forma de calibração e principais fontes de incerteza de um Braço de Medição;
4. Descrição da metodologia desenvolvida para combinar as informações provenientes do sensor / braço;
5. Estimativa da incerteza do sistema integrado através da medição de geometrias conhecidas (plano e esferas) e da análise das influências do sensor óptico e da metodologia de integração (etapa 4) sobre essa incerteza.

Podendo-se concluir:

1. Com relação ao Sensor Óptico

Não se tem conhecimento até o presente momento de nenhuma norma que regulamente a calibração de sensores óptico tipo “Folha de Luz”. Sendo assim, uma forma de calibração foi definida e adotada no escopo do trabalho permitindo que as incertezas padrão do sensor óptico fossem estimadas em $\pm 0,3$ mm (direção “Zs”) e $\pm 0,1$ mm (direção “Xs”).

Estes valores de incerteza são considerados relativamente altos, sendo parcelas significativas no cálculo da incerteza padrão combinada do sistema integrado. Para reduzi-las, mudanças nos componentes e nos parâmetros de especificação do sensor óptico devem ser feitas.

Cabe ressaltar que tais mudanças não foram implementadas no âmbito

deste trabalho em virtude de uma expectativa de aquisição de um sensor óptico comercial pelo projeto ROBOTURB, o que não foi concretizado até este momento em virtude da falta de recursos temporária do PADCT, que levou à interrupção do processo de importação.

2. Com relação ao Braço de Medição

Por não se ter conhecimento de nenhuma norma específica de calibração e por não ser este o objetivo do trabalho, a incerteza do braço de medição foi considerada igual ao valor estipulado pelo fabricante ($U_{95\%} = \pm 0,076 \text{ mm}$).

Essa consideração, entretanto, não inviabilizou em nenhum momento a avaliação metrológica do sistema integrado. Isso porque as incertezas do sensor óptico e, conseqüentemente, da integração numérica foram, como esperado, bem superiores às incertezas do braço.

3. Com relação à Integração Sensor / Braço

Devido às características físicas e operacionais do sensor óptico e do braço de medição, o acoplamento mecânico de ambos foi feito através de parafusos. Mesmo sendo modesta, esta forma de acoplamento foi considerada adequada, uma vez que não se observou nenhuma movimentação relativa do conjunto braço / sensor durante sua utilização.

Para a integração numérica, desenvolveu-se uma metodologia simples e sem precedentes na bibliografia pesquisada, a dupla medição de uma esfera padrão: uma utilizando somente o braço de medição, outra utilizando o conjunto braço / sensor.

Capaz de calcular os parâmetros de posição e orientação do sensor óptico em relação ao apalpador em algumas poucas iterações, essa metodologia se mostrou, num primeiro momento, bastante adequada. Através de simulações computacionais, foram feitas medições ideais da esfera padrão (sem presença de erros aleatórios), obtendo-se valores exatos para tais parâmetros, com elevadíssima taxa de convergência.

Em condições reais, observou-se que a presença de fontes de incertezas,

principalmente as do sensor óptico, podem afetar os cálculos dos parâmetros, causando dispersões em suas estimativas, seja para os dados de translação, seja para os dados de rotação.

Essas dispersões, no entanto, não invalidam, a priori, a metodologia de dupla medição da esfera padrão. Ficou claro que é necessário um sensor tipo folha de luz de melhores características para avaliar concretamente o desempenho desta metodologia. A incerteza do sensor, nesse caso, deveria ser não superior a $\pm 0,1$ mm em ambas as direções.

4. Com relação à Incerteza de Medição do Sistema Integrado

Medições em peças com geometria conhecida (um plano, uma esfera de raio igual a 20 mm e outra, de raio igual a 25 mm) permitiram estimar a incerteza padrão (68%) do sistema integrado.

Os resultados alcançados nessas medições foram:

- Medição do Plano: $\pm 1,2$ mm;
- Medição da Esfera de 20 mm: $\pm 1,6$ mm;
- Medição da Esfera de 25 mm: $\pm 1,4$ mm.

Por segurança, estima-se que a incerteza do sistema integrado é dada pelo maior valor observado, ou seja, igual a $\pm 1,6$ mm.

Este valor foi verificado em uma análise feita com base nas incertezas do sensor óptico combinadas com as dispersões dos parâmetros de posição e orientação do sensor em relação ao apalpador. Nessa verificação, a incerteza calculada atingiu o patamar de $\pm 1,1$ mm. Portanto, considera-se a incerteza padrão de $\pm 1,6$ mm como sendo um valor razoável para as condições deste trabalho.

Acredita-se, contudo, que valores menores podem ser obtidos com esse sistema, principalmente se o mensurando for posicionado numa região próxima àquela onde a esfera padrão foi medida durante a determinação dos parâmetros do sensor óptico em relação ao apalpador.

A forma mais natural de redução dessa incerteza envolve a utilização de

um sensor óptico de melhor qualidade e estudo de sua influência sobre o cálculo de sua posição e orientação em relação ao apalpador.

5. Com relação à Medição de Superfícies Livres

Analisando os resultados obtidos nas medições de superfícies livres, pode-se afirmar que a integração de um sensor óptico a laser tipo “Folha de Luz” em uma Máquina de Medir por Coordenadas (Braço de Medição) para medições de forma tridimensionais é perfeitamente viável, podendo ser de grande utilidade em determinados processos de medição como, por exemplo, em medições da geometria de peças aeronáuticas, navais e automobilísticas. A possibilidade de se fazer medições sem contato direto com mensurando, sua alta velocidade de medição se comparado com MMC tradicionais (eixos cartesianos) ou mesmo com o braço mecânico de medição sem nenhum tipo de acoplamento, versatilidade e portabilidade são pontos de destaque desse sistema, podendo atender a uma gama de aplicações industriais.

Como recomendações para trabalhos futuros, sugerem-se:

- ✓ O reprojeto ou compra de um novo sensor óptico tipo “Folha de Luz”, devendo-se considerar com mais veemência as características ópticas de seus componentes. A incerteza recomendada não deve ser superior a $\pm 0,1$ mm;
- ✓ O estudo de novas metodologias experimentais para cálculo dos parâmetros de posição e orientação do sensor em relação ao apalpador visando, em conjunto com o novo sensor, reduzir suas incertezas e, conseqüentemente, a incerteza do sistema integrado;
- ✓ Implementação de uma saída de dados em forma padronizada e compatível com sistemas CAD (por exemplo, *.DXF), viabilizando a adaptação de seus recursos para uso em ambientes industriais;
- ✓ A calibração do braço de medição em laboratório credenciado garantindo, assim, a rastreabilidade dos resultados;
- ✓ Análise mais aprofundada dos efeitos do cálculo do centróide

(determinação dos pixels de maior intensidade na imagem do sensor) sobre as incertezas do próprio sensor;

- ✓ Fazer um estudo comparativo da relação *incerteza de medição / custo* na medição de peças quaisquer, considerando o uso da Máquina de Medir por Coordenada, do Braço de Medição e do Sistema Integrado, de forma a orientar a aplicação industrial de cada um desses sistemas em função de seus benefícios econômicos e de qualidade.

Referências Bibliográficas

- [1] Kowarschik, R. , Kühmstedt, P. , Schreiber, W. – “*3-Coordinate Measurement with Structured Light*”, Fringe 93 – 2nd International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, p. 204 – 208, Bremen, Alemanha, 1993.
- [2] Ip, W. L. R. , Loftus, M – “*Adaptive and Compensation Methods in Free-form Surface Assessment*”, International Mechanical Engineering Part B: Journal of Engineering Manufacture, v. 210, p. 135 – 145, 1996.
- [3] Jung, M. , Hill, M. , McBride, J. W. – “*Surface Reconstruction from Discrete Data Obtained by a 3D Surface Measurement System*”, Laser Metrology and Machine Performance IV – LAMDAMAP 99, p. 277 – 286, 1999.
- [4] Qiulin, D. , Davies, B. J. – “*Surface Engineering Geometry for Computer-Aided Design and Manufacture*”, Ellis Horwood Limited, 1987.
- [5] Sousa, A.R. – “*Medição por Coordenadas*”, Laboratório de Metrologia, Escola Técnica Federal de Santa Catarina - ETFSC, 1998.
- [6] Brown and Sharpe, documento disponível on-line
<http://brownandsharpe.com/mfg/mfg5/mfg5art6.html>
- [7] Catálogo Zeiss – Software - CNC Coordinate Measuring Machines.
- [8] BS 7172, “*Assessment of Position, Size and Departure from Nominal Form of Geometric Features*”, British Standards Institution, Londres, 1989.

- [9] Mayer, J. R. R. , Mir, Y. A. , Balazinski, M. – “Automatic Digitizing of Sculptures Parts with Coordinate Measuring Machines”, IMEKO – ISMQC’95 – 5th IMEKO TC 14 Symposium on Dimensional Metrology in Production and Quality Control, p. 303 – 312, Zaragoza, Espanha, 1995.
- [10] Huang, S. , Lin, C. – “A Three-Dimensional Non-Contact Measurement System”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 13, Número 6, p. 419 – 425, 1997.
- [11] Harding, K. – “Overview of 3D Contouring Systems for Reverse Engineering Applications”, Rapid Prototyping Conference, Dayton, EUA, 1993.
- [12] Cielo, P. – “Optical Techniques for Industrial Inspection” , Academic Press Inc., 1988.
- [13] Jais, S. – “Investigations on Optical 3D Measurement Techniques and Implementation of na Optical Range Sensor”, Tese de Doutorado, Johannes Kepler Universität, Linz, Alemanha, 1997.
- [14] Valle, O. T. – “Apalpador Optoeletrônico para Máquinas de Medir por Coordenadas”, Dissertação de Mestrado, UFSC, 1993.
- [15] Bartl, J. , Hain, M. – “Contactless Methods for Measurement of Geometrical Quantities”, IMEKO – ISMQC’95 – 5th IMEKO TC 14 Symposium on Dimensional Metrology in Production and Quality Control, p. 361 – 367, Zaragoza, Espanha, 1995.
- [16] Fantin, A. – “Medição de Formas Livres Tridimensionais por Topogrametria”, Dissertação de Mestrado, UFSC, 1999.
- [17] Freire, J. L. F. , Cavaco, M. A. M. – “Engineering Applications of Shadow Moiré and Fringe Patterns Analysis”, ATEM’97 – International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics, p. 147 – 150, 1997.

- [18] Lewandowski, J. , Ménard, B. , Hennequin, D. – “Triangulation with Simultaneous Recording of Reference and Object Fringe”, SPIE v. 2065, p. 211 – 218, 1994.
- [19] Curless, B. , Levoy, M. – “Better Optical Triangulation Through Spacetime Analysis”, International Conf. on Computer Vision, p. 987-994, June 1995.
- [20] Dufour, M. , Cielo, P. – “Optical Inspection for Adaptive Welding”, 1983
- [21] Kennedy, W. P. – “The Basic of Triangulation Sensors”, The Journal of Applied Sensing Technology, 1998.
- [22] Chen J. , Zhou H. , O`yang D. , Buckley S. – “Research on a Geometric Model Based 3D Inspection Machine”,
<http://www.halcyon.com/metolius/BUCKLEY.html>.
- [23] Bradley, C. , Vickers, G. W. – “Free-form Surface Reconstruction for Machine Vision Rapid Prototyping”, Optical Engineering, v. 32, p. 2191-2200, 1993.
- [24] Gonçalves Júnior, A. A. – “Metrologia – Parte I”, Laboratório de Metrologia e Automação, UFSC, 1997.
- [25] Dusman, F. , Mudronja V. , Bakula S. - “Temperature - The Biggest Problem In Asuring Accuracy of 3-D CMMs”, Proc. of the XIV IMEKO World Congress, V. VIII, p. 261 - 266, Tampere, 1997.
- [26] Lücke, F. J. , Hermann J. , Scharf P. - “Ein Neuartiges Verfahren Zum Kalibrieren Von Lichtschnittsensoren”, ABW: 2 Workshop 3D-BV TAE, 1996.
- [27] Häusler, G. - “Calibration of Optical 3D Sensors”, http://www.physik.uni-erlangen.de/haeusler/research/kalib/kalib_e.html

- [28] Kim, K. I. - "A New Measuring Strategy for Sculptured Surfaces Using Offset Surfaces", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, V. 118, p. 646-651, 1996.
- [29] Miguel, P. A. C. - "CMM Performance Verification, Consideration for a Virtual Artefact Approach", *Tese de Doutorado*, The University of Birmingham, 1996.
- [30] McCullough, F. , Hill, M. , McBride J.W. - "Review of Optical Techniques for Three-Dimensional Surface Measurement", *Laser Metrology and Machine Performance IV, LAMDAMAP*, p. 296-307, 1999.
- [31] Häusler, G. - "About the Scaling Behaviour of Optical Range Sensor", *Fringe 97*, p. 147-155, 1997.
- [32] Catálogo FaroArm – Portable & Precise Measurement Solutions.
- [33] Baribeau, R. , Rioux, M. - "Influence of Speckle on Laser Range Finders", *Applied Optics*, V. 30, No. 20, p. 2873-2878, 1991.
- [34] Hüser, D. , Rothe, H. - "Robust Averaging of Signals for Triangulation Sensors", *Measuring Science Technology*, V. 9, p.1017-1023, 1998.
- [35] Dorsch, R. , Häusler, G. , Herrmann, J. M. - "Laser Triangulation: Fundamental Uncertainty in Distance Measurement", *Applied Optics*, V. 33, No. 7, p. 1306-1314, 1994.
- [36] Brückner, P. , Triebel, M. - "Berührungslose 3D-Geometriemessung", *Carl Hanser Verlag*, v. 39, p. 1148-1152, 1994.
- [37] Iovenitti, P. - "Accuracy of Three-Dimensional Measurement Using a Single Image", *Optical Engineering*, v. 36, No. 1, p. 47-55, 1997.
- [38] Laermann, K. H. - "New Perspectives for Laser Metrology - Vision and Instructions", *Fringe 93*, p. 15-23, 1993.

- [39] Häusler, G. , Herrmann, J. M. - "Physical Limits of Optical Range-Sensors", *Fringe* 93, p. 175-181, 1993.
- [40] Chugui, Y. V. , Ladigin, V. I., Pastushenko, A. I. - "Experience of Triangulation Method Using for Industrial Dimensional Inspection", *Laser Metrology* 99, Florianópolis, 1999.
- [41] Mashimo, K. , Nakamura, T. , Tanimura, Y. - "Development of Optical NonContact Sensor for Measurement of Three-Dimensional Profiles Using Depolarized Components of Scattered Light", *Optical Engineering*, v. 36, No. 1, p. 227-234, 1997.
- [42] Klette, R. , Koschan, A. , Schlüns, K. , Rodehorst, V. - "Evaluation of Surface Reconstruction Methods", <http://www.cs.tu-berlin.de/~cvworld>
- [43] Richard, J. - "Laser Scanning Measurement of Dimensions and Positions", IMEKO – ISMQC'95 – 5th IMEKO TC 14 Symposium on Dimensional Metrology in Production and Quality Control, p. 319 – 327, Zaragoza, Espanha, 1995.
- [44] Schleifenbaum, B. - "High Precision Contactless Measurement", IMEKO – ISMQC'95 – 5th IMEKO TC 14 Symposium on Dimensional Metrology in Production and Quality Control, p. 328 – 336, Zaragoza, Espanha, 1995.
- [45] Schneiter, J. - "A Reconfigurable Laser Ranging Instrument", *SPIE*, v. 2065, p. 237-250, 1994.
- [46] Gooch, R. - "Optical Metrology in Manufacturing Automation", *Sensor Review*, v.18, No. 2, p. 81-87, 1998.
- [47] Wilson, M. - "Vision Systems in the Automotive Industry", *Industrial Robot: An International Journal*, v. 26, No. 5, p.354-357, 1999.

- [48] Rzeznik, T. - "In-Line Laser Measurement in the Assembly Process", *Industrial Robot*, v. 24, No. 1, p.16-23, 1997.
- [49] Clark, J. - "Implementing Non-Contact Digitisation Techniques Within the Mechanical Design Process", *Sensor Review*, v. 20, No. 3, p. 195-201, 2000.
- [50] Bradley, C. - "The Application of Reverse Engineering in Rapid Product Development", *Sensor Review*, v. 18, No. 2, p.115-120, 1998.
- [51] Butler, C. - "Probes for High Precision Dimensional Measurement", *Sensor Review*, v. 14, No. 1, p. 24-26, 1994.
- [52] Dalton, G. - "Reverse Engineering Using Laser Metrology", *Sensor Review*, v. 18, No. 2, p. 92-96, 1998.
- [53] Keferstein, C. P. , Marxer, M. - "Testing Bench for Laser Triangulation Sensors", *Sensor Review*, v. 18, No. 3, p. 183-187, 1998.
- [54] Microsoft - "Language Reference of Microsoft Visual Basic", Microsoft Corporation, 1995.
- [55] Kovac, I. , Frank, A. - "High-Precision Testing and Calibration Metrology for Portable Coordinate Measuring Arms", *Laser Metrology 99*, Florianópolis, 1999.
- [56] Kovac, I. , Frank, A. - "A New Anthropoidic Measuring Device for Robot Aided Measurement", 25th International Symposium on Industrial Robots, p. 655-661, Hannover, 1994.
- [57] McIvor, A. M. - "Calibration of Laser Stripe Profiler", 3DIM' 99 - 2nd International Conference on 3-D Imaging and Modeling, Ottawa, Canadá, Outubro 1999.
- [58] Prieto, F. , Redarce, T. , Boulanger, P. , Lepage, R. - "CAD-Based Range Sensor Placement for Optimum 3D Data Acquisition", 3DIM' 99 - 2nd

International Conference on 3-D Imaging and Modeling, Ottawa, Canadá, Outubro 1999.

- [59] Lamb, D. G., Baird, D. L., Greenspan, M. A. - "An Automation System for Industrial 3-D Laser Digitizing", 3DIM' 99 - 2nd International Conference on 3-D Imaging and Modeling, Ottawa, Canadá, Outubro 1999.
- [60] Yi, X. , Camps, O. I. - "3D Object Depth Recovery From Highlights Using Active Sensor and Illumination Control", IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Santa Bárbara, Estados Unidos, Junho 1998.
- [61] Suenaga, Y. - "3D Measurement Technologies for Computer Animation", Computer Animation' 96, p. 167-174, Geneva, Suíça, Junho 1996.
- [62] Certificado de Calibração do Laser Diodo, Lasiris, Setembro 2000.
- [63] Disponível on-line: <http://www.math.ist.utl.pt/~calves/courses/>